

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program M 2301 – Strojní inženýrství

Strojírenská technologie
Zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

Vliv stavu napjatosti na křivku zpevnění u hlubokotažného materiálu

Effect of stress state on the hardening curves at the deep-drawing material

Lukáš BARAN

KSP – TP -

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Solfronk, Ph. D - *TU v Liberci*

Konzultant diplomové práce: Ing. Jiří Sobotka, Ph. D - *TU v Liberci*

Rozsah práce a příloh:

Počet stran:	60
Počet obrázků:	31
Počet tabulek:	9
Počet příloh:	0
Počet jiných příloh:	1 CD

Datum: 24. května 2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení	Lukáš B A R A N
Studijní program	M2301 Strojní inženýrství
Studijní obor	2303T002 Strojírenská technologie
Zaměření	Tváření kovů a plastů

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

Vliv stavu napjatosti na křivku zpevnění u hlubokotažného materiálu

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Materiály používané v konstrukci automobilu.
2. Základy fotogrammetrie a optické systémy pro analýzu deformace.
3. Experimentální zjištění vlivu stavu napjatosti na křivku přetvoření u zvoleného hlubokotažného materiálu.
4. Vyhodnocení prováděných experimentů.
5. Závěr.



ANOTACE
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní
Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program:

M 2301 – Strojní inženýrství

Student:

Lukáš Baran

Téma práce:

Vliv stavu napjatosti na křivku zpevnění u
hlubokotažného materiálu

Effect of stress state on the hardening curves at
the deep-drawing material

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Pavel Solfronk, Ph. D. - *TU v Liberci*

Konzultant diplomové práce:

Ing. Jiří Sobotka, Ph. D. - *TU v Liberci*

Abstrakt:

Porovnání křivek zpevnění pro různé stavy napjatosti pro hlubokotažný materiál je hlavním tématem, kterým se zabývá tato diplomová práce. Teoretická část této diplomové práce se zabývá hlavně fotogrammetrií, jakožto základem bezkontaktního optického systému ARAMIS. Nechybí zde ani kapitola, zabývající se sortimentem plechů používaných v automobilovém průmyslu. V experimentální části této práce jsou stanoveny křivky zpevnění pro jednoosý stav napjatosti a pro dvouosý stav napjatosti, který byl zjišťován při Bulge testu. V závěru práce pak jsou tyto křivky porovnávány.

Abstract:

Comparison hardening curves for different stress state for deep-drawing material is the main topic covered in this thesis. The theoretical part of this thesis deals mainly with photogrammetry as a basis for non-contact optical system ARAMIS. There is also a chapter dealing with an assortment of sheets used in the automotive industry. In the experimental part of this work are set hardening curves for uniaxial stress state and the biaxial stress state, which had been measured during the test Bulge. In conclusion, these curves are compared.

Místopřísežné prohlášení

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 24. května 2013

.....
Lukáš Baran
Kvasiny 108
517 02 Kvasiny

Poděkování

Velmi rád bych poděkoval hlavně panu Ing. Pavlu Solfronkovi Ph.D., který byl vedoucím této diplomové práce, za odborný dozor po celou dobu tvorby této diplomové práce. Děkuji také za rady, které mi poskytl jak při tvorbě teoretické, ale i experimentální části. Pomohl mi i při získávání řady odborných znalostí. Panu Ing. Jiřímu Sobotkovi Ph.D. patří také nemalý dík, neboť mi pomohl také při tvorbě obou částí této diplomové práce. Nerad bych zapomněl i na zbylé členy Katedry strojírenské technologie, zejména z oddělení tváření kovů a plastů, kteří mi byli nápomocni nejen během tvorby této diplomové práce, ale i v průběhu mého studia.

Neměl bych zapomenout na rodiče a bratra, kterým patří největší poděkování, a kteří mně umožnili studium na Fakultě strojní v Liberci a bez jejichž podpory bych nemohl studovat. Dík patří i kamarádům a známým, kteří mi byli oporou po celou dobu mého studia.

Ještě jednou Všem moc děkuji

Lukáš Baran



OBSAH

OBSAH	6
SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ	7
1 ÚVOD.....	9
2 TEORETICKÁ ČÁST	10
2.1 FOTOGRAMMETRIE	10
2.1.1 Historie fotogrammetrie.....	10
2.1.2 Rozdělení fotogrammetrie.....	13
2.1.3 Optické měřicí systémy.....	14
2.1.3.1 Měřicí systém ARAMIS	15
2.1.3.2 Měřicí systém PONTOS	16
2.1.3.2 Měřicí systém ARGUS	16
2.2 PLECHY POUŽÍVANÉ V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU	18
2.2.1 Oceli na hluboký tah	18
2.2.1.1 Hlubokotažné plechy z ocelí uklidněných hliníkem.....	21
2.2.2 IF oceli	24
2.2.2.1 IF oceli s BH efektem	26
2.2.3 Vysokopevnostní materiály	27
2.2.3.1 Dvoufázové oceli	27
2.2.3.2 Oceli s transformačně indukovanou plasticitou (TRIP oceli) .	28
2.2.3.3 Vícefázové oceli (CP oceli).....	28
2.2.3.4 Martenzitické oceli	28
2.2.3.5 TWIP oceli	29
2.4 NUMERICKÉ SIMULACE.....	30
2.4.1 Numerické simulace v tváření	31
2.4.2 Metoda konečných prvků	31
2.4.2.1 Postup výpočtu u Metody konečných prvků	33
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	37
3.1 Cíle diplomové práce.....	37
3.2 Výpočet napětí a deformací ze statické zkoušky tahem.....	37
3.3 Použitý materiál	39
3.4 BULGE test.....	40
3.4.1 Příprava vzorků	41
3.4.2 Příprava měřicího systému	43
3.4.3 Vlastní měření	46
3.5 Vlastní výpočet skutečného napětí a deformace	49
3.5.1 Výpočet napětí a deformací pro vzorky z kruhové tažnice.....	51
3.5.2 Výpočet napětí a deformací pro vzorky z eliptické tažnice	52
4 VÝSLEDKY	55
5 ZÁVĚR	58
6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	59

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

ZKRATKA NEBO SYMBOL	JEDNOTKY	VÝZNAM
a	[mm]	délka vedlejší osy elipsoidu
A_{80mm}	[%]	tažnost materiálu
Al	[-]	hliník
b	[mm]	délka hlavní osy elipsoidu
b	[mm]	šířka vzorku
BH	[-]	bake hardened steel
c	[s ⁻¹]	rychlost deformace
C	[MPa]	pevnostní koeficient
C	[-]	uhlík
CQ	[-]	comercial duality (plechy běžné kvality)
Cu	[-]	měď
Cr	[-]	chrom
DDQ	[-]	deep drawing quality (hlubokotažné plechy)
DQ	[-]	drawing duality (tažné plechy)
dL	[mm]	přírůstek délky
dφ	[-]	přírůstek napětí
e	[-]	základ pro přirozený logaritmus
E	[MPa]	modul pružnosti ve smyku
EDDQ	[-]	extra deep drawing quality (zvlášť hlubokotažné plechy)
EDDQ-S	[-]	extra deep drawing duality-Super (super hlubokotažné plechy)
F	[N]	zatěžující síla
FEM	[-]	finite element method (metoda konečných prvků)
KUT	[-]	komplexní ukazatel tvářitelnosti
L	[mm]	konečná délka
L₀	[mm]	počáteční délka
ΔL	[mm]	změna délky
L_u	[mm]	délka při přetržení
Mn	[-]	mangan
Mg	[-]	hořčík
n	[-]	exponent deformačního zpevnění
Nb	[-]	niob
p	[MPa]	tlak kapaliny
P	[-]	fosfor
R	[MPa]	smluvní napětí
R_e	[MPa]	smluvní mez kluzu
R_m	[MPa]	smluvní mez pevnosti
R_{p0,2}	[MPa]	smluvní hodnota meze kluzu
R₁	[mm]	poloměr zaoblení ve směru hl.napětí
R₂	[mm]	poloměr zaoblení ve směru vedl.napětí



r_m	[-]	součinitel normálové anizotropie
S	[-]	síra
S	$[mm^2]$	průřez vzorku v daném okamžiku
S_0	$[mm^2]$	počáteční průřez vzorku
Ti	[-]	titan
T	[K]	termodynamická teplota
t	[mm]	tloušťka v daném okamžiku
t_0	[mm]	počáteční tloušťka
V	[-]	vanad
V	$[mm^3]$	objem v daném okamžiku
V_0	$[mm^3]$	počáteční objem
β	[-]	poměr poloměrů zaoblení
ε	[-]	poměrné prodloužení
φ	[-]	skutečné přetvoření
φ_i	[-]	intenzita přetvoření
φ_1	[-]	hlavní přetvoření
φ_2	[-]	vedlejší přetvoření
φ_3	[-]	přetvoření ve směru tloušťky
σ	[MPa]	skutečné napětí
σ_i	[MPa]	intenzita napětí
σ_1	[MPa]	hlavní napětí
σ_2	[MPa]	vedlejší napětí
σ_3	[MPa]	napětí ve směru tloušťky

1 ÚVOD

Mezi jednu z nejčastěji používaných technologií tváření patří tažení. Uplatňuje se například při výrobě povrchových karosářských dílů. Aby bylo možné zvolit vhodný materiál, je třeba znát nejprve jeho charakteristické vlastnosti při tažení. Cílem této diplomové práce bylo zjistit, jaký vliv má změna stavu napjatosti na křivku zpevnění u hlubokotažného materiálu.

Pro vstupní data numerických simulací je třeba znát materiálový model. U jednoosého namáhání tahem je možné základní charakteristiku – závislost skutečné deformace na skutečném napětí určit pomocí statické zkoušky tahem. Ze statické zkoušky tahem se dají dále vypočítat a zjistit další mechanické veličiny, které charakterizují daný materiál. V praxi se však často vyskytuje víceosá napjatost. Pokud je materiál namáhán dvouosým tahem, lze tuto charakteristiku a vstupní data do numerických simulací určit pomocí tzv. hydraulického Bulge testu. Princip zkoušky spočívá ve vyboulování vzorku zkoušeného plechu pod tlakem přiváděné kapaliny.

K zjištění napětí a deformace při Bulge testu bylo v této práci použito optického měřicího systému ARAMIS od německé společnosti GOM GmbH. Tato firma se zabývá úspěšnou výrobou a vývojem optických měřicích systémů a softwaru již řadu let. Tyto optické měřicí systémy pracují na principu fotogrammetrie, o níž se zmiňuje tato práce v teoretické části. Zjištěné hodnoty efektivního napětí a deformace při Bulge testu byly porovnány s hodnotami skutečného napětí a deformace ze statické zkoušky tahem pro jednoosý tah.

Diplomová práce vznikla v rámci řešení projektu studentské grantové soutěže (SGS 28005) na základě podpory specifického vysokoškolského výzkumu na TUL.

2 TEORETICKÁ ČÁST

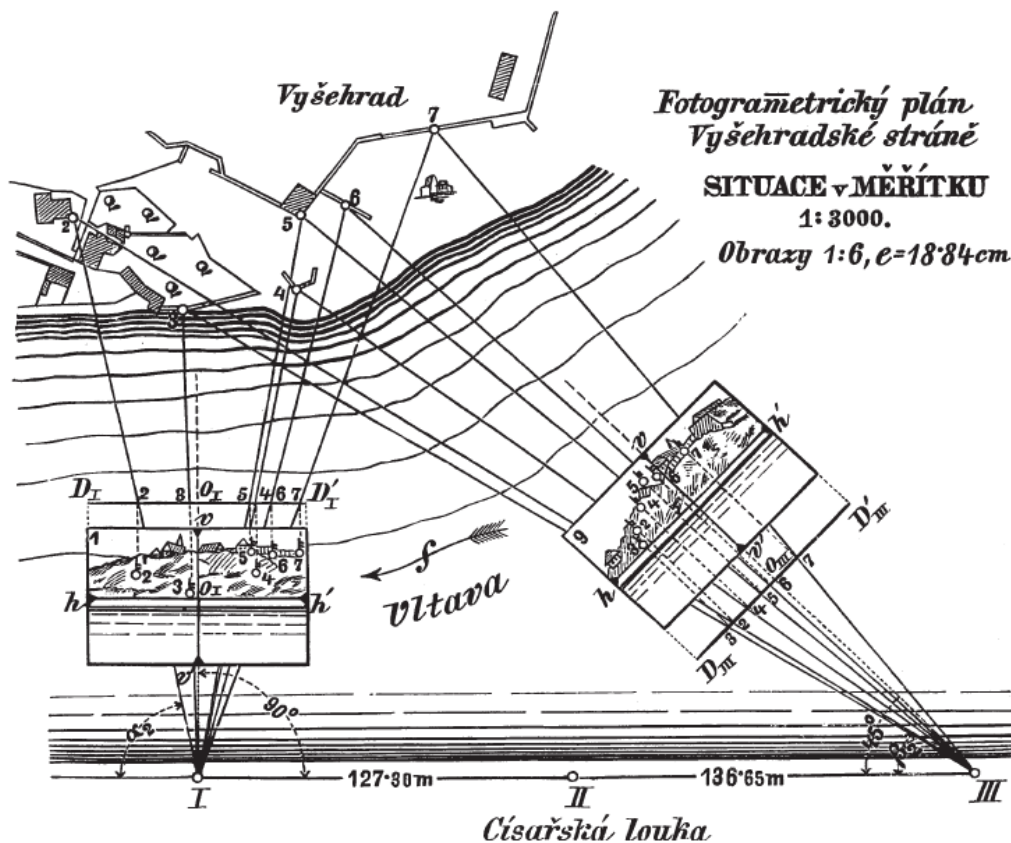
2.1 FOTOGRAMMETRIE

Základem měřících optických systémů je princip fotogrammetrie. Pod pojmem fotogrammetrie rozumíme všeobecné metody, které jsou schopny získat z jednoho či více snímků nepřímou metodou informace o objektech jako např. je tvar a poloha objektu, který je na snímku zachycen. Fotogrammetrii je tedy možné uplatnit v zásadě všude, kde lze požadovaný objekt vyfotografovat a následně vyhodnotit.

2.1.1 Historie fotogrammetrie

Počátky fotogrammetrie sahají daleko před vynález fotografie. Centrální promítání, které je základní zobrazovací metodou ve fotogrammetrii, bylo uvedeno do praxe jako prvním *LEONARDEM DA VINCI* (1452 - 1519). Ten popsal a sestrojil *dírkovou komoru*, která umožnila překreslování předmětu, který byl pozorován, pomocí centrální projekce. Tuto komoru byla opatřena spojnou čočkou za pomoci *JANA KEPLERA* (1571 -1630) a byla nazvána *camera clara*. Vynález fotografie, který reprezentovali *NICÉPHORE NIEPCE* (1765-1833) a *LOUIS DAGUERRE* (1787-1851) následně zdokonalil britský vynálezce *W.H.F. TALBOT* (1800-1877), který jako první zavedl do technologie zpracování proces negativ - pozitiv a uskutečnil tak poprvé zhotovení většího počtu stejných fotografií z jednoho negativu. Do té doby byla každá fotografie neopakovatelným originálem. Německý stavební inženýr *ALBRECHT MEYDENBAEUR* (1834-1921) posléze využil fotografie k měření fasád. K tomuto účelu sestrojil vlastní kameru (obr. 2 -vpravo) o snímkovacím formátu 400x400 mm, kde jako nosič fotografické emulze použil skleněné desky. Dva roky po vynálezu fotografie zkonstruoval slovenský vědec *prof. JOSEF MAXIMILIAN PETZVAL* (1807-1891) první moderní objektiv a zavedl do geometrické optiky exaktní výpočetní metody, čímž také významně přispěl k rozvoji fotogrammetrie.

Za zakladatele fotogrammetrie je pokládán francouzský kartograf *AIMÉ LAUSSE DAT* (1819-1917), který krátce po vynálezu fotografie začal využívat fotografické snímky pro měřické účely. Podle jeho návrhu byl zkonstruován mechanikem *M. BRUNNEREM* v roce 1859 fototeodolit. Jednalo se o fotografický přístroj na získávání pozemních fotogrammetrických snímků. Krátce poté se český vědec *Dr. KAREL KOŘISTKA* (1825 - 1906) na své studijní cestě v roce 1862 s fotogrammetrií seznámil přímo od Laussedata a po návratu zhotovil první fotogrammetrické měření u nás. Ze dvou stanovišek (Hradčany a Petřín) byly zhotoveny fotografické snímky a průsekovou metodou byly určeny polohy věží a jiných významných bodů na území města Prahy (obr. 1). Po něm se zabýval fotogrammetrií prof. *F. STEINER*, který je autorem jedné z prvních učenic fotogrammetrie s názvem *Fotografie ve službách inženýra*. Tato kniha vyšla v roce 1893. Velmi brzy došlo k uvědomění si velkého významu této měřické metody a v letech 1893 - 1897 bylo opět průsekovou metodou provedeno mapování Vysokých Tater v měřítku 1:25 000.

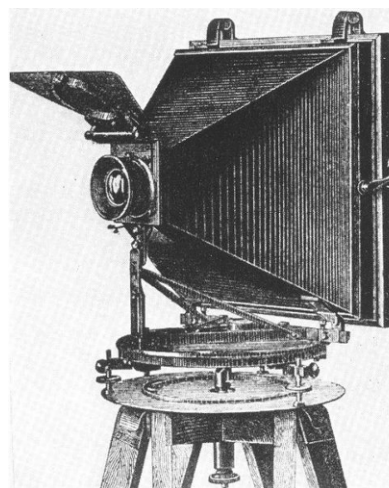
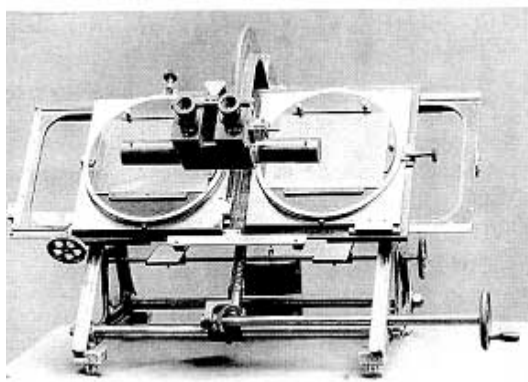


Obr. 1: Fotogrammetrický plán Vyšehradské stráně [1], [2]

Průseková fotogrammetrie se však ukázala v mnoha ohledech nepraktická. Uplatněním jednoduchého principu metody stereoskopie (technologie, která umožňuje prostorový zrakový vjem vyvolaný dvourozměrnou předlohou) ze začátku 20. století, byly mnohé z problémů průsekové metody rázem odstraněny a fotogrammetrie tak mohla nalézt další uplatnění.

Průkopníkem stereofotogrammetrie byl také *Dr. CARL PULFRICH* (1858-1927), kterému se povedlo v roce 1901 zkonstruovat první přístroj na stereoskopické proměřování souřadnic – stereokomparátor (obr. 2 -vlevo). Tento přístroj položil základy dalším, mnohem složitějším přístrojům pro analogové (opticko-mechanické) vyhodnocování.

S fenoménem letectví se současně začala rozvíjet i fotogrammetrie letecká. První snímky z balónu byly pořízeny už v roce 1858 francouzským fotografem *GASPARD-FÉLIX TOURNACHON* (1820-1910) - známějším spíše pod pseudonymem *NADAR*. Nicméně velký rozmach zaznamenala letecká fotogrammetrie až během první světové války pro účely sledovací a interpretační. Nastal velmi rychlý vývoj jak fotogrammetrických kamer, tak i vyhodnocovacích přístrojů.



Obr. 2: Stereokomparátor dle návrhu Pulfrichaze z roku 1901 (vlevo), Meydenbauerova kamera vynalezená v roce 1872 (vpravo) [2]

U nás se první letecké stereofotogrammetrické mapování uskutečnilo v roce 1921 na území města Trutnova. Obrovský význam letecké fotogrammetrie pro mapování si můžeme uvědomit z následující skutečnosti:

Vojenský zeměpisný ústav do r. 1938 zmapoval pozemní fotogrammetrií cca 1 600 km² a leteckou přes 67 000 km² území tehdejšího Československa.

S rozvojem výpočetní techniky se do popředí vyhodnocení fotogrammetrických snímků jednoznačně dostala analytická metoda. Tato metoda byla známá již dříve, ale nebyla z důvodu velké početní náročnosti používána. Princip analytického stroje na základě řešení přímého vztahu mezi snímkovými a geodetickými souřadnicemi byl patentován finským fotogrammetrem *Dr. UKI HELAVOU* již v roce 1957. Úspěšná konstrukce přístroje, schopného vyhodnocovat snímky touto metodou, byla realizována až o dvacet let později. Základem analytického stroje je stereokomparátor s motorickým pohybem snímků, digitální odečítání polohy ovládacích prvků a výkonný počítač s obslužným programem, Analytické přístroje se velmi rychle začaly vyvíjet po roce 1980, kdy výpočetní technika dosáhla použitelných rychlostí zpracování a dostatečné kapacity uchování naměřených dat. Raketový vývoj počítačových technologií koncem 80. let umožnil vznik prvních digitálních systémů a vznikla nová oblast - digitální fotogrammetrie, která je velmi využívána v současnosti. [1], [2]

2.1.2 Rozdělení fotogrammetrie

Fotogrammetrie se dělí podle různých kritérií jako např. podle počtu snímků pořízených současně, podle stylu pořízení a vyhodnocení snímků nebo podle časové dostupnosti snímků atd. [1], [2]

Jako příklad je zde uvedeno rozdělení **podle časové dostupnosti snímků**, které lze rozdělit na:

- *real time* - snímání a vyhodnocení jednoho snímku v reálném čase v průběhu zadaného procesu. Frekvence snímání koresponduje s frekvencí změny (deformace, pohyb) objektu,
- *offline* - sekvenční snímkování, časově nebo prostorově oddělené vyhodnocení,

- *online* - simultánní snímání více snímků a bezprostřední vyhodnocení této skupiny snímků. Kamery jsou většinou přímo připojeny k počítači.

Rozdělení fotogrammetrie **podle způsobu zpracování snímků:**

- *metody analogové* - využívá pro vyhodnocení opticko-mechanických zařízení,
- *metody analytické* - převádí snímkové souřadnice do geodetických pomocí prostorových transformací, které se řeší na počítačích,
- *metody digitální* - využívá jako vstupní informace digitální obraz.

Rozdělení fotogrammetrie **podle počtu vyhodnocovaných snímků:**

- *jednosnímková* - slouží k určení jen rovinné souřadnice předmětu,
- *dvousnímková* - slouží k vyhodnocení prostorové souřadnice objektu.

Rozdělení fotogrammetrie **podle polohy:**

- *pozemní* – využívá se při určování kubatur těžby v povrchových dolech nebo v kriminalistice při dokumentování místa trestného činu či dopravní nehody. Dosah pozemní fotogrammetrie je závislý na typu měřické komory, většinou se pohybuje kolem 500m,
- *letecká* – nachází praktické využití při zhotovování map nejrůznějších měřítek a použití, zejména je nenahraditelná v těžko přístupných nebo nepřístupných oblastech, nelze s ní však snímkovat předměty, které se překrývají,
- *kosmická* – kamera nebo snímkový zařízení je umístěno na vesmírném tělese nebo družici,
- *podmořská* – nachází využití při pátrání archeologických památkách pod hladinou moře.

[4]

2.1.3 Optické měřicí systémy

Mezi hlavní oblasti použití optických měřicích systémů patří 3D digitalizace, 3D technika pro měření souřadnic, analýza deformace a kvalitativní kontrola. Tyto systémy se používají ve vývoji výrobku a zajištění kvality, stejně jako při zkouškách materiálů nebo součástek. Mezi firmy, které

se zabývají touto problematikou, si získala jednu z předních pozic na trhu německá firma GOM GmbH, a to právě díky intenzivní spolupráci s automobilovým průmyslem, kdy přenesla požadavky z průmyslu do produktů. GOM GmbH byla založena v roce 1990 jako vedlejší produkt Technické univerzity v Braunschweigu a vyvíjí vysoce kvalitní optické měřicí systémy, přičemž jeden z nich (systém ARAMIS), byl použit v experimentální části této diplomové práce. Mezi její další produkty patří např. systém TRITOP, sloužící pro určování přesných bodových dat měřeného objektu. Systémy ARGUS a PONTOS pak slouží k deformační resp. kinematické analýze. [1]

2.1.3.1 Měřicí systém ARAMIS

Systém ARAMIS pomáhá lépe pochopit materiál a jeho deformační chování a je ideální pro sledování pokusů s vysokým časovým a místním rozlišením. ARAMIS je bezkontaktní a materiálově nezávislý měřicí systém, který poskytuje pro statické nebo dynamicky zavedené testovací objekty přesná data jako např. hlavní a vedlejší deformace, rychlost deformace, 3D posunutí a rychlosti, 3D plocha souřadnice.

Systém ARAMIS je ideálním řešením pro stanovení vlastností materiálů (statické zkoušky tahem, křivky mezní tvážitelnosti, Youngův modul, atd.), analýzu komponentů (crash testy, analýzy vibrací, odolnost studie, atd.) a ověření metody konečných prvků a numerických simulací. Systém ARAMIS je unikátní řešení, jež přináší kompletní analýzu 3D povrchu. Stejný systém nastavení se používá pro různé aplikace (viz tab.1) a lze je snadno integrovat do stávajících testovacích prostředí. Systém ARAMIS poskytuje rozhraní pro import CAD dat, která se používají pro 3D transformace souřadnic a nebo 3D výpočty tvaru odchylky. Software ARAMIS zpracovává v reálném čase více výsledků měření pozic z povrchu testovacích objektů. Jedná se o přímý přenos na testovací zařízení, zařízení pro sběr dat a zpracování softwarem (např. LabView, MS Excel, atd.).

Systém ARAMIS podporuje velmi širokou škálu ověření simulací FEA (Finite Element Analysis - Metody konečných prvků). Určení mat. parametrů systémem ARAMIS pomáhá k hodnocení a zlepšování stávající

materiálových modelů. Import souborů dat výsledků FEA umožňuje porovnání (tzv.mapování) těchto dat s reálnými deformacemi. Celé měření, vyhodnocení a dokumentace procesů se provádí v rámci integrovaného softwaru ARAMIS. [3]

Tab. 1 – Možnosti využití systému ARAMIS

-optimalizace procesu tváření (limitní křivka tváření FLC)	- zkoumání materiálu v nelineárních oblastech
-zkoušky materiálu	- dimenzování součástí
-testování nových materiálů	-zjišťování materiálových vlastností
-výpočty stability	-charakteristika procesu tečení

2.1.3.2 Měřicí systém PONTOS

PONTOS je bezkontaktní optický systém určený pro měření kinematiky objektů. Je schopen analyzovat, vyhodnotit a dokumentovat kinematické a dynamické chování měřených vzorků. Systém digitálních kamer snímá změnu polohy bodů v průběhu zatížení a software potom vyhodnotí a porovná 3D souřadnice jednotlivých bodů. Ukázka dvojice kamer systému PONTOS je na obr. 3 (vpravo). Systém využívá reflexních měřících bodů z důvodů lepší viditelnost při vysokých frekvencích snímání, kdy se úměrně zkracuje čas otevření závěrky kamery. Z pohledu identifikace bodu systémem rozeznáváme dva typy bodů (obr. 3 -vlevo):

- *Kódované* - Tento typ bodu je systémem automaticky identifikován a je mu přiřazeno jedinečné označení dle binárního kódu.
- *Nekódované* - V tomto případě je identifikace založena na poloze bodů. Výhodou je snadná produkce a velikost potřebné plochy.



Obr. 3: Kódované a nekódované body (vlevo), dvojice kamer systému PONTOS (vpravo) [1]

2.1.3.2 Měřicí systém ARGUS

Systém ARGUS je speciálně určen pro měření součástek lisovaných z plechu. Před tvářením se na povrch plechu vyleptá pravidelná mřížka bodů. Po skončení tváření se deformovaná mřížka nasnímá digitálním fotografickým přístrojem a zpracuje na počítači. Z výsledné deformované mřížky systém dokáže určit deformaci, změnu tloušťky plechu a geometrii výrobku. Takto se může sledovat proces tváření a nalézt kritická místa. Další možnosti využití optického systému ARGUS jsou uvedeny v tab.2, která obsahuje i srovnání s využitím systému PONTOS.[3], [5]

Tab. 2 – Možnosti využití systémů PONTOS a ARGUS

PONTOS	ARGUS
-dynamické chování komponentů	-optimalizace procesu tváření
-poloha komponent v aerodynamickém tunelu	-ověřování a optimalizace simulace tažení plechů
-deformace při aerod. zatížení	-detekce oblastí s kritickou deformací
-crash testy	-optimalizace lisovacích nástrojů
-drop testy	-zkoušky materiálu

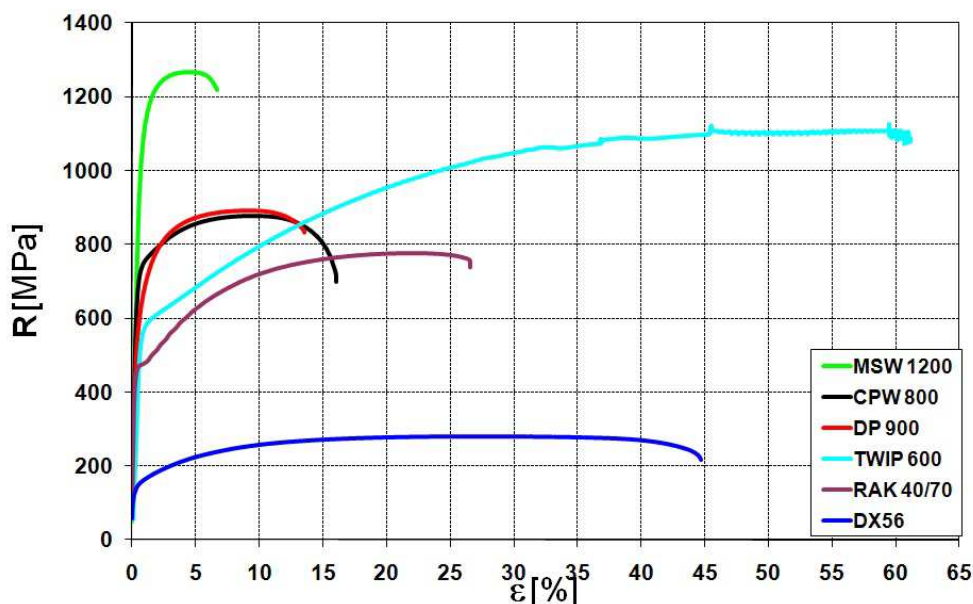
2.2 PLECHY POUŽÍVANÉ V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU

Vývoj karoserie by se neobešel bez vývoje a získávání nových či modifikovaných materiálů, které by se uplatnily při stavbě karoserie. Nejběžnějším materiálem, který se používá pro stavbu karoserie je ocel. Je to způsobeno tím, že těží ze své rozšířenosti, poměrně nízké ceně a samozřejmě i dobře zvládnuté technologii zpracování. Užití alternativních materiálů je odkázáno na speciální aplikace, jakými jsou sportovní nebo luxusní vozidla, kde cena není úplně směrodatný faktor, určující postavení na trhu. [6]

2.2.1 Oceli na hluboký tah

Hlubokotažné oceli jsou používány na výrobu hlubokotažných plechů. Plechy musí vykazovat především dobré plastické vlastnosti. Tyto oceli jsou nízkouhlíkové s minimálním obsahem doprovodných prvků. Úprava mechanických vlastností a jejich stability se provádí mikrolegováním hliníkem (Al), titanem (Ti), vanadem (V), borem (B), zirkoniem (Zr) a niobem (Nb). Tyto materiály se využívají zejména pro karosářské plechy. [6]

Z tahových diagramů (obr. 4) vyplývá, že hlubokotažné materiály jsou velice odlišné v mechanických hodnotách oproti vysokopevnostním materiálům. Hlubokotažné materiály mají mnohem větší zásobu plasticity, než materiály vysokopevnostní, což umožňuje navrhovat výlisky složitější. K lomu dochází u vysokopevnostních materiálů zanedlouho po překročení meze kluzu než u materiálů hlubokotažných. U těch není nárůst meze pevnosti tak strmý a dosahují mnohem většího prodloužení (hodnoty tažnosti).[7],[8]



Obr. 4: Průběh tahové zkoušky různých druhů ocelí [9]

Hlubokotažné materiály se také zásadně liší ve velikosti následného odpružení po tváření. Obecně závisí odpružení na geometrii nástroje (velký podíl má tažný poloměr), tloušťce materiálu, teplotě, ale především na vlastnostech tvářeného materiálu, zejména na jeho modulu pružnosti E .

Z ocelí této skupiny se vyrábějí tvářením zastudním, ale také zatepla, plechy vhodné pro další zpracování zastudena. Aby probíhala plastická deformace při tažení již při nízkém napětí, požaduje se co nejnížší mez kluzu. Nejjakostnější oceli mají mez kluzu max. 160 MPa, tažnost minimálně 45%. Poměr $(R_e/R_m) \cdot 100$ u jakostních ocelí je asi 60%, u běžných ocelí je vyšší než 75%. Pokud je tento poměr dostatečně nízký, plech při tváření nepruží a dá se lehce deformovat. Hlubokotažné oceli musí mít plastické vlastnosti v celém tvářeném objemu, vyhovující tloušťkovou toleranci, minimální sklon ke stárnutí a nízkou cenu. Při lisování se nesmí tvořit na povrchu deformační čáry. Technické dodací podmínky hlubokotažných plechů udává ČSN 42 0128, rozměry ČSN 42 5302.

Vlastnosti hlubokotažných plechů ovlivňuje dovalcovací a svinovací teplota a chemické složení. Mez kluzu zvyšuje zejména uhlík, jehož obsah se proto snižuje pod 0,10%. Matrici má tvořit ferit s malým množstvím perlitu. Ve struktuře má být vyloučen na hranicích zrn terciární cementit, který snižuje plastické vlastnosti.

Sekundární metalurgie používaná dnes v hutnických závodech umožňuje vyrábět ekonomicky oceli s obsahem uhlíku max. 0,02%. Tento obsah je již tak nízký, že uhlík zůstává při rychlejším ochlazování rozpuštěn ve feritu. Tvářitelnost plechů se zlepšuje, pokud jsou ve struktuře feritická zrna čočkovitého tvaru orientovaná delšími osami ve směru tváření.

Obsah mangan se pohybuje v rozmezí 0,20% až 0,60%, protože mangan zvyšuje pevnost feritu. Určité množství manganu je nutné na vázání síry, aby se zaručila tvářitelnost zatepla. Obsah křemíku má být co nejnižší, protože zvyšuje mez kluzu a pružnosti. Fosfor zpevňuje ferit a zvyšuje křehkost. Omezuje se proto na max. 0,030% až 0,035%. Obsah síry musí být co nejnižší, protože sulfidy zhoršují tvářitelnost. Chrom, nikl, molybden a měď zvyšují pevnost feritu, jejich obsah má být proto nižší než 0,12% až 0,15%.

U ocelí pro hluboký tah je důležité také věnovat pozornost velikosti zrna, protože jemnozrnné oceli mají vyšší skluz. Optimální velikost zrna podle ČSN u neuklidněných ocelí je 5 a více, u uklidněných 6 až 7.

Oceli na hluboký tah se odlévají jako neuklidněné nebo uklidněné. Plechy z neuklidněných ocelí mají lepší povrch a hrubší zrna. Pokud se však vyrábějí válcováním zastudena, je nutné je zpracovat je asi do čtyř týdnů, protože po delším skladování stárnou, přičemž se zvyšuje mez kluzu a klesá tažnost. Protože se delším skladováním vlastnosti neuklidněných ocelí mění, jsou závazné mechanické vlastnosti zjištěné u výrobce. U vzorků odebraných za osm dní po tváření se povoluje zvýšení meze kluzu o 10 MPa a snížení tažnosti o 1%. S deformačním stárnutím se musí počítat také při vícestupňovité redukci zastudena.

Oceli uklidněné hliníkem mají menší sklon ke stárnutí, ale jemnější zrna, takže mají vyšší mez kluzu. Výhodné je, že hliník nezvyšuje mez kluzu feritu. Jeho obsah se pohybuje mezi 0,02% až 0,05%. Dusík je možno vázat titanem nebo vanadem, které tvoří nitridy TiN a VN. Nevýhodou uklidněných ocelí je ovšem horší povrch ingotu a tím i plechu. Pokud se má vyhodnotit jakost hlubokotažné oceli, je nutno provést chemický a metalografický rozbor, určit koeficient plošné anizotropie, exponent zpevnění a koeficient normálové anizotropie. V tabulkách 7 a 8 je uvedeno chemické složení některých ocelí určených především na hluboké tažení a jejich rozdělení dle ČSN 42 0127.[8]

Tab.3 – Přehled chemického složení některých ocelí na hluboký tah [8],[10]

Značka	Chemické složení v %					Skupina dle ČSN 42 0127
	C _{max.}	Mn _{max}	Si _{max.}	P _{max.}	S _{max.}	
11 300	0,09			0,04	0,040	HT
11 301	0,08	0,40		0,03	0,030	HT
11 304	0,07	0,40		0,025	0,025	VT
11 305	0,07	0,40		0,025	0,025	VT, min.0,025% Al
11 320	0,11			0,045	0,045	HT
11 321	0,10	0,45		0,035	0,035	ST
11 325	0,10	0,45		0,035	0,035	ST, min 0,025 Al
11 330	0,13			0,050	0,050	MT
11 331	0,11	0,45	0,15	0,035	0,035	MT
11 402	0,10	0,55	0,15	0,03	0,030	VT, 0,06-0,20% Ti
12 011	0,09	0,20-0,45		0,035	0,040	min. 0,020% Al

Tab.4 – Rozdělení ocelí na hluboký tah do skupin podle ČSN 42 0127 [8],[10]

Označení	Charakteristika
MT	Vhodné na mírné tažení
ST	Vhodné na střední tažení
HT	Vhodné na hluboké tažení
VT	Vhodné na velmi hluboké tažení

2.2.1.1 Hlubokotažné plechy z ocelí uklidněných hliníkem

Hlubokotažné plechy z ocelí uklidněným hliníkem, zastudena válcované, se až do nedávna používaly v největší míře pro stavbu karoserie vozidel. Ve struktuře mají velmi nízký obsah uhlíku, řádově stovky miliontin. Tyto plechy mají zaručeny mechanické vlastnosti a jejich výborná tvárnost je předurčila pro tvarově složité výlisky a to především pohledových dílů, na které jsou kladeny vysoké nároky i z hlediska povrchových vlastností. V závislosti na chemickém složení, mechanických vlastnostech a způsobu výroby byly hlubokotažné plechy rozděleny do několika skupin. V současné době upravuje rozdělení hlubokotažných plechů uklidněných hliníkem norma EN 10 142.

Pro úpravu mechanických vlastností se tyto ocele legují nebo mikrolegují. Hlubokotažné oceli obsahují mangan (Mn), který zvyšuje tvrdost a pevnost. Naopak však houževnatost plechů snižuje. Jeho obsah by měl být max. 0,40%. Jeho přítomnost je nutná, vzhledem k tomu že na sebe váže síru za vzniku dobře tvářitelných sulfidů. Uklidněné oceli také obsahují malé množství křemíku (Si), který materiálu zvyšuje pevnost a zhoršuje jeho plastické vlastnosti. Doporučený obsah je max. 0,03%. Pro zvýšení pevnosti se tyto ocele také mikrolegují hliníkem (Al), vanadem (V), titanem (Ti) apod. Nežádoucí prvky v hlubokotažných ocelích, jako je fosfor (P) a síra (S), by měli být obsaženy max. z 0,025%. Plyny, jako je dusík (N) a kyslík (O), tvoří nekovové vměstky (oxidy a nitridy) a působí na stárnutí ocelí a snížení plastických vlastností u hlubokotažných plechů. Mezi další doprovodné prvky, které se do oceli dostávají ze surového železa a ocelového odpadu, patří např. cín (Sn), měď (Cu), chrom (Cr), nikl (Ni) a molybden (Mo). Většina těchto prvků také materiál zpevňuje, proto je snaha jejich obsah minimalizovat.

Podstatný vliv na tvářitelnost a mechanické vlastnosti hlubokotažných ocelí má mikrostruktura. Základní složkou nízkolegovaných hlubokotažných plechů tvoří ferit a cementit. U feritu je zásadní velikost a tvar a tvar feritického zrna, u cementitu je to množství, tvar a jeho rozložení. Nejvýhodnější tvar feritických zrn je zploštělý. Velikost těchto zrn má vliv na kvalitu povrchu výtažku. Plechy s velikostí zrna 5 a 6 (určováno podle ČSN 42 0463) dávají po tvářecí operaci povrch drsnější, než v případě velikosti zrn 7 a 8. rovněž nerovnoměrná velikost zrn způsobuje různou deformaci tvářeného plechu a to především při operaci tažení zvyšuje nebezpečí vzniku prasklin. U zvláště hlubokotažných plechů se připouští rozdíl ve velikosti jednotlivých zrn nejvýše v rozsahu dvou čísel. Nepříznivější tvar cementitu je jeho vyloučení v tzv. globulích v pravidelném rozložení na základní feritické fázi. Naopak uspořádání cementitu ve tvaru lamel nebo v řádcích není pro operaci tažení tak výhodné.

Především žárově pozinkované hlubokotažné plechy z ocelí uklidněných hliníkem, které v důsledku složitých teplotních procesů v pozinkování lince podléhají stárnutí a tím změnám mechanických

vlastností, nejsou schopny dosáhnout vyššího stupně tváritelnosti než zaručuje skupina DDQ (tab. 5). V důsledku toho byly vyvinuty oceli bez intersticií, tzv. IF ocele.

Tab. 5 Přehled mechanických a technologických vlastností vybraných mat.

Skupina	$R_{p0,2}$ [MPa]	A_{80mm} [%]	r [-]	n [-]	$R_m/R_{p0,2}$ [-]	KUT [-]
DX 51 D(CQ)	240-260	26-30	1,0-1,2	0,14-0,16	1,2-1,3	30-40
DX 52 D (DQ)	220-240	30-36	1,2-1,4	0,16-0,18	1,3-1,4	40-50
DX 53 D (DDQ)	200-220	36-38	1,4-1,6	0,18-0,20	1,4-1,5	50-57
DX 54 D (EDDQ)	180-200	38-40	1,6-1,8	0,20-0,22	1,5-1,67	57-67
DX 56 D (EDDQ-S)	<180	>40	>1,8	>0,22	> 1,67	>67

Vysvětlivky použitých zkratk materiálů s jejich charakteristikou:

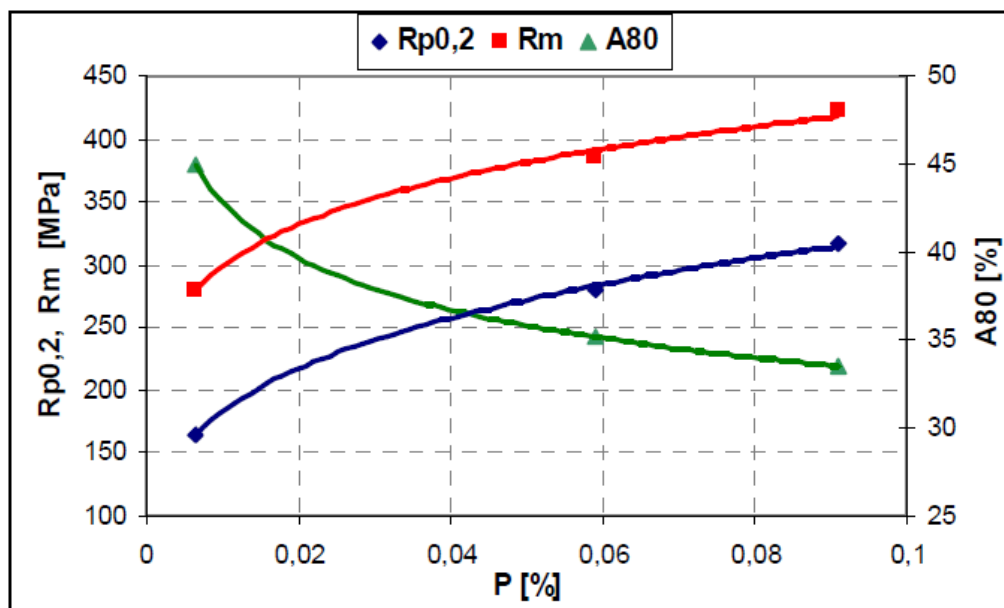
- CQ - plechy běžné kvality (Comercial Quality)
- DQ -
 - tažné plechy (Drawing Quality)
 - nízkouhlíkové ocele s dobrou tažností
 - díky nízkému obsahu uhlíku jsou dobře svařitelné
 - v automobilovém průmyslu jsou určeny na boční plechy, plechy střech, podběhy, víko zavazadlového prostoru anebo kapoty
- DDQ -
 - hlubokotažné plechy (Deep Drawing Quality)
 - jsou odolné vůči stárnutí, mají dobrou tváritelnost za studena a dostatečnou svařitelnost
 - mikrostruktura je obvykle čistě feritická, anebo ve velmi malém množství se mohou objevit karbidy v objemu zrn.
 - mají poměrně slabé únavové vlastnosti
 - nijak výrazně nepřispívají svými vlastnostmi k bezpečnosti v případě havárie

- to je předurčuje pouze na taková místa konstrukce automobilů, jako jsou vnitřní plechy dveří, komplikované výlisky podlah, vnitřní podběhy, blatníky a nebo střešní plechy
- EDDQ - zvlášť hlubokotažné plechy (Extra Deep Drawing Quality)
- EDDQ-S - super hlubokotažné plechy (Extra Deep Drawing Duality-Super)

2.2.2 IF oceli

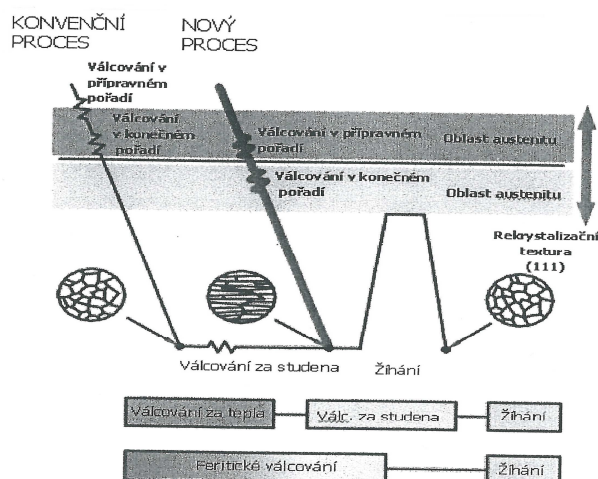
Pojmenování těchto ocelí pochází z anglického názvu *Interstitial-Free steels* (oceli bez intersticií). Tyto oceli jsou dneska velmi často používány pro stavbu karoserie. Oceli dosahují vhodného poměru mezi tažností a pevností, což se dá ovlivnit množstvím *Nb* a *Ti*. Toto množství je neustále zkoušeno pro dosažení optimálního kompromisu. Oceli mají interstiticky rozpuštěné atomy uhlíku a dusíku vázané ve stabilních karbidonitridech (*TiCN*, *NbCN*). Toho se v praxi dosahuje mikrolegováním *Nb* či *Ti* anebo kombinací *Nb* a *Ti*. V *IF ocelích* vytvářejí uhlík a dusík precipitáty s mikrolegujícími prvky (*Ti*, *Nb*) namísto toho, aby byly intersticiálně rozpuštěny ve feritu. Mikrostruktura je pak tvořena vysoce tvárnou feritickou maticí s takovými precipitáty, jako jsou *TiC*, *TiS*, *TiN*, *NbC* apod. Ovšem množství *Nb* má vliv na velikost zrna, na stárnutí oceli a také zvyšuje rekrystalizační teplotu. Důsledkem je energetická náročnost při výrobě, vyšší žíhací teploty.

Faktory, které dále ovlivňují výsledné mechanické vlastností jsou obsah dalších legujících prvků (*Mn*, *P*) způsobující zpevnění (obr. 5), velikost feritického zrna, množství a rozptýlení precipitátů a úběr při hladícím válcování. Tímto válcováním lze podstatným způsobem ovlivnit tvářitelnost materiálu, jelikož je prováděn za studena. Má za následek zpevnění a vznik deformační struktury, které snižují tvářitelnost.



Obr. 5: Vliv Fosforu na mechanické vlastnosti IF oceli [6]

Mechanické hodnoty IF ocelí jsou poměrně nízké. Mez kluzu je asi 150 MPa a mez pevnosti asi 300 MPa. IF oceli disponují vysokou tažností nad 42% a průměrnou hodnotou součinitele normálové anizotropie r_m nad 1,7 a také vysokou hodnotou exponentu deformačního zpevnění. V důsledku ochuzení zrn o intersticiální prvky mohou být náchylné k porušení na hranicích zrn při sekundárních tvářecích operacích (obr.6). Přísada B do ocelí s Nb a Ti tento nedostatek eliminuje a to prostřednictvím difúze B na hranicích zrn a jejich zpevnění. [6]



Obr. 6: Technologické procesy válcování IF plechů [6]

2.2.2.1 IF oceli s BH efektem

Nevýhodou *IF ocelí* je jejich nízká mez kluzu, proto byly vyvinuty *IF ocele* vykazující *BH efekt* (Bake Hardening – teplem vytvrditelné), což znamená, že materiál je tepelně vytvrzen - zpevněn. Toho se dosahuje při relativně nízké teplotě (170°C po dobu 20 minut), a to při vypalování laku. Tímto procesem lze zvýšit mez kluzu o 30 až 80 MPa. Schématicky je tento proces znázorněn na obr. 7. Velikost efektu je z hlediska chemického složení závislá na obsahu *Mn* a *S* a z hlediska předchozí deformace závisí na historii zatěžování (válcování zastudena) a na parametrech rekrytalizačního žíhání. Tyto oceli v sobě spojují výbornou tvářitelnost při zpracování (lisování) díky nízké mezi kluzu s následným nárůstem této hodnoty po tepelném vytvrzení. Použití těchto materiálů se výrobci snaží v současné době snižovat kvůli zhoršené rozměrové stabilitě.

Z hlediska BH efektu rozlišujeme 2 základní typy ocelí pro výrobu plechů:

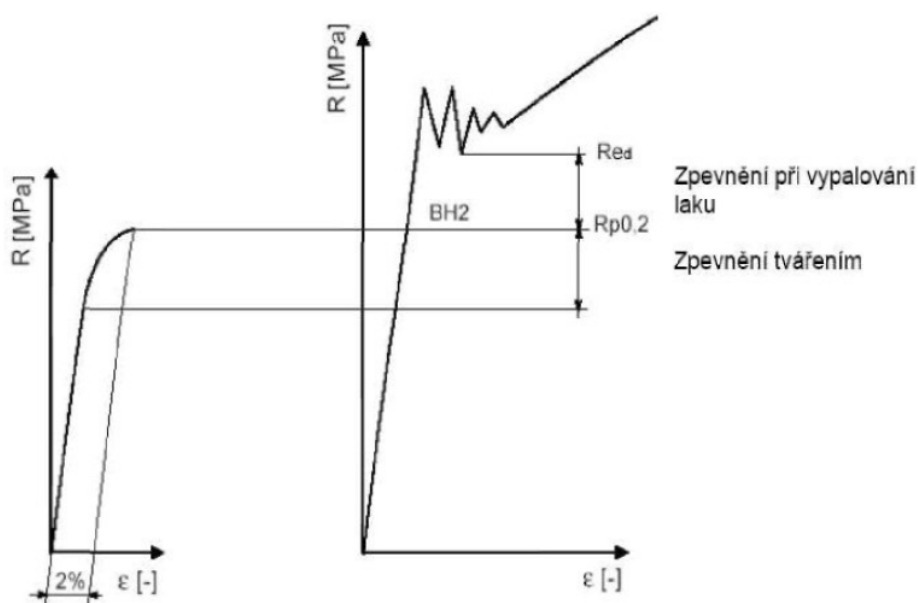
- *se zvýšeným obsahem C*

Množství legujících prvků titanu a niobu je pouze na takové úrovni, aby část intersticiálně rozpuštěného uhlíku ve feritové mřížce zůstala i po válcování za tepla nevázána na vzniklé karbidy legur. K *BH efektu* potom dochází při nižších teplotách vypalování laku nebo žíhání. Jelikož v tuhém roztoku existuje určité množství nevázaného uhlíku, nelze dosáhnout vysoké hlubokotažnosti plechu. Tyto plechy mají nižší koeficient normálové anizotropie *r* než konvenční plechy z *IF ocelí*. Tyto materiály se používají přednostně.

- *se zvýšeným obsahem Ti resp. Nb*

Při tváření se intersticiální uhlík v tuhém roztoku prakticky nevyskytuje. Tím je zaručena vynikající hlubokotažnost těchto plechů. Uhlík potřebný pro vytvrzovací efekt se získá rozpuštěním karbo-nitridických precipitátů při vysokoteplotních žíhání na kontinuální žíhací lince a následným rychlým ochlazením. Vytvrzení je tím větší, čím větší je žíhací teplota a rychlost ochlazení. Výroba i použití těchto ocelí je energeticky nákladnější než u ocelí, které mají vyšší obsah uhlíku.

Tyto materiály lze obecně použít tam, kde je požadována dobrá tažnost a zároveň vyšší mez kluzu, jako jsou například u karoserie automobilu střecha, kapota, víko zavazadlového prostoru apod. Jedná se většinou o výlisky s velkou plochou a malým přetvořením, kde požadovanou pevnost dílu nemůžeme zajistit například prolisy.



Obr. 7 Schématické znázornění *BH efektu* při vypalování laku [7]

2.2.3 Vysokopevnostní materiály

Do této skupiny lze zařadit materiály, které využívají hlavně strukturního zpevnění, díky němuž jsou dosahovány speciálně fyzikálně-mechanické vlastnosti, třeba i podle konkrétního dílu, na který je materiál určen. Strukturní zpevnění je způsobeno využitím kombinace rozdílných fází, dále podle jejich velikosti a obsahu v základní feritické matici.

2.2.3.1 Dvoufázové oceli

Dvoufázové oceli (DP-dual phase) – nízkouhlíkové oceli, které mají ve své feritické matici s 20%-70% malých ostrůvků martenzitu nebo bainitu. Mez kluzu těchto ocelí je určena obsahem a rozložením martenzitu ve feritické matici, ale také vzniklým pracovním zpevněním. Mez kluzu nedosahuje ani

70% meze pevnosti (mez pevnosti je $R_m \approx 1000$ MPa) u těchto ocelí, což je velmi dobré a výhodné pro tváření. [6]

2.2.3.2 Oceli s transformačně indukovanou plasticitou (TRIP oceli)

Struktura těchto ocelí je tvořena feritem, bainitem a malým obsahem nepřeměněného zbytkového austenitu, jehož obsah se pohybuje kolem 5%-10%. Tyto oceli obsahují více uhlíku než DP oceli, množství může být i vyšší než 1%. Stupeň deformace potřebný pro aktivaci přeměny austenitu na martenzit je dán množstvím uhlíku ve zbytkovém austenitu. Při nižším obsahu uhlíku se tato transformace aktivuje v průběhu procesu tváření, zvýší se tak koeficient deformačního zpevnění. Při velkém množství uhlíku nedochází během tváření k aktivaci, ale až při prudkém nárazu, čímž dojde k pohlcení velkého množství energie. Tyto oceli mohou dosáhnout pevnosti 700 MPa a tažnosti 28%. [6]

2.2.3.3 Vícefázové oceli (CP oceli)

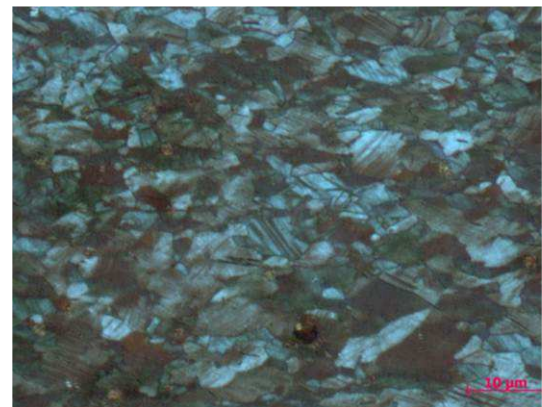
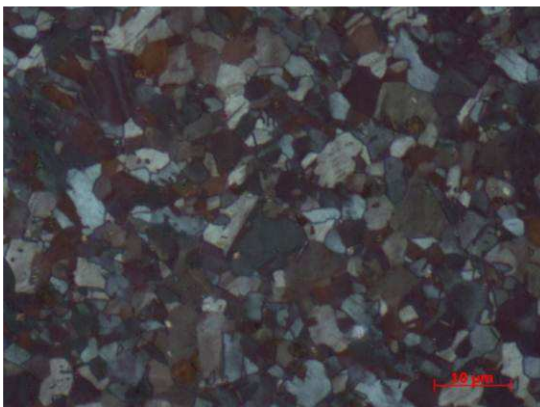
CP (complex phase) oceli jsou více fázové a mají jemnozrnnou strukturu, která je tvořena feritem, bainitem, martenzitem a austenitem. Přísady a technologické pochody jsou podobné jako u DP a TRIP ocelí, ale navíc jsou mikrolegovány Nb, Ti a V pro tvorbu jemného precipitátu. Pro tyto oceli je typický vysoký stupeň deformačního zpevnění, způsobený z dopředu definované unikátní jemnozrnné struktury. To je příslibem dobré tvářitelnosti a také velmi dobré rozměrové stálosti výlisků. Jejich mez pevnosti je vyšší než 800 MPa. [6]

2.2.3.4 Martenzitické oceli

Tyto oceli dosahují velmi vysokých mechanických vlastností (mez pevnosti je větší než 1400 MPa). Je to způsobeno martenzitickou přeměnou při minimálním zůstatku feritické fáze se zachováním omezené tvářitelnosti. Ta je závislá především na objemu feritické fáze v materiálu, kterou ovlivňuje množství přidávaného uhlíku. Další zvýšení tvářitelnosti lze získat především popouštěním nebo dosažením feriticko-bainitické struktury. [6]

2.2.3.5 TWIP oceli

Tyto oceli nazývané TWIP (**T**Winning **I**nduced **P**lasticity), jsou oceli se indukovanou plasticitou, která je zdvojená. Jejich obsahem je z 15-25% Mn a dostačující množství Al a Si, které se nacházejí v austenitické matici. Tyto oceli nacházejí svoje uplatnění především na nosných dílech konstrukce karoserie, jež jsou vystaveny nadměrnému zatížení. Tyto oceli mají velmi vysokou pevnost (dosahuje hodnot až 1000 MPa) a vhodnou vlastností je i jejich tvárnost (zejména při nízké teplotě a vysoké rychlosti deformace). Aby došlo k dosažení TWIP účinku je nezbytné zajistit přesné složení slitiny takovým způsobem, aby transformační energie nedovolila napěťově indukovanému austenitu přeměnu na martenzit, a došlo tak k mechanickému dvojčatění.[6]



Obr. Struktura TWIP oceli před deformací – vlevo
a po deformaci – vpravo [9] ,[6]

2.4 NUMERICKÉ SIMULACE

Při konstrukci lisovacího nářadí a návrhu technologie lisování nachází stále větší uplatnění numerická simulace. Cílem počítačové simulace (obr. 8) je dosažení věrohodných výsledků blížících se co možná nejvíce realitě. Inženýři pak mohou provádět řadu dílčích zkoušek bez nutnosti vytvářet složité a fyzicky náročné experimentální prototypy. [11]



Obr. 8 –Ukázka z programu PS2G-AUTOSTAMP, který se používá pro simulace technologie tváření.Jsou zde znázorněny stavy výlisku v průběhu tažení s viditelným prostorovým zvlněním a barevnou mapou ztenčení [12]

Numerickou simulací se většinou rozumí aplikace metody konečných prvků (dále FEM), se zadáním odpovídajících rychlostních, posunových a kontaktních okrajových podmínek. K dostatečné spolehlivosti výsledků simulace je nezbytnou součástí, aby program měl k dispozici materiálová data, a přiblížil tak výsledky k reálnému procesu tváření. Materiálová data pro výpočtový model simulace tváření jsou obvykle zjišťována tahovou zkouškou, která je dostatečně jednoduchá a zároveň podává informace o plastickém anizotropním chování daného materiálu. Pro zjištění vztahu (korelace) numerické simulace se skutečným procesem tváření je zapotřebí provést simulaci lisování dílu, jehož chování při lisování je dostatečně známo. Nejjednodušší a současně přesné porovnání lze provést na vhodně zvolených řezech dílu, na jehož povrch byla před lisováním nanесena síť deformačních kružnic. Z praktických důvodů a při přihlédnutí k množství faktorů a činitelů, které ovlivňují kvalitu výlisku při vlastní produkci, lze stejný postup aplikovat pro modelové tváření na relativně jednoduchém a levném přípravku s vhodnou geometrií, která umožní dosáhnout na výlisku výraznější změny sledovaných veličin. Jednoduchá geometrie je zároveň výhodná pro numerickou simulaci z důvodu času potřebného pro přípravu modelu.[11],[12]

2.4.1 Numerické simulace v tváření

Simulace procesu tváření je založena na výpočtu pomocí iterací. Prvním krokem je vygenerování trojúhelníkových nebo čtvercových prvků v každé iteraci metody konečných prvků. Výpočet je pak s cílem simulovat tváření realizován za malého vychýlení tvářecího nástroje. Toto vychýlení musí být dostatečně malé s ohledem na minimální velikost vygenerovaných prvků. Pak je po každém přírůstku deformace aplikováno následující schéma:

- Vygenerování prvků, které jsou v ploše
- Iterativní úprava prvků, aby byly rovnoměrně rozmístěny
- Úprava prvků, které jsou v zakřiveném prostoru (zpravidla se jedná o uzly, které jsou v blízkosti měnícího se tvaru povrchu a není ještě dosaženo minimální velikosti prvku)

Tento proces se opakuje, dokud nástroj nedosáhne své finální polohy. Dnešní simulační programy nabízí příjemné uživatelské prostředí, které lze modifikovat, dle požadavků zákazníka. Lze do nich vkládat díly či tažnice ve formátech IGS, VDA a CatiaModel. Umožňují dále během přípravy simulace upravovat geometrii takto vložených modelů, měnit nástřih či z virtuální tažnice velmi jednoduše vytvořit další náradí, jako je např. tažník, přidržovač. Konstruktorům a technologům jsou tyto programy schopny interpretovat jimi požadované výsledky. Rychle a jednoduše popíší fyzikální stav výlisku z hlediska ztenčení, zhutnění plechu, napjatosti či deformace. Důležitou schopností tohoto softwaru je, že výsledky shodují s výsledky z reálného lisování. Jedním z takovýchto programů je PAM-STAMP 2G.[13]

2.4.2 Metoda konečných prvků

Mezi jednu z nejmodernějších numerických metod, určených pro řešení okrajových úloh mechaniky kontinua, patří Metoda konečných prvků (FEM). Je určena především pro úlohy, kdy v určitých místech řešené oblasti jsou zadány hodnoty funkcí, resp. hodnoty derivací těchto hledaných funkcí.

Je to dosud nejuniverzálnější známá metoda a je bezprostředně spjata s použitím samočinných počítačů.

Je všeobecně známa jako varianta zobecněné Rottovy metody se speciální bází, tj. jako metoda variační. Její použití je neobyčejně široké; například při řešení problémů mechaniky neformovatelných těles, takže pomocí FEM se dnes řeší úlohy statiky a dynamiky konstrukcí a jiných aplikací téměř ve všech odvětvích průmyslu (např. stavebnictví, průmysl strojný, lodní, letecký a energetika). Krom toho se FEM uplatňuje i při řešení různých fyzikálních jevů (např. proudění), ale též úloh biomechaniky a dalších. Pomocí FEM byly již řešeny i v inženýrské praxi tak odlehle problémy, jako je stavba a mechaniky srdce, proudění krve, pevnostní problémy lidské kosti atd.

Při posuzování a navrhování stavebních konstrukcí a strojních součástí má FEM dnes již své místo nejen ve výzkumu, ale též v běžné projekční praxi. Metoda FEM je universální metodou vzhledem k typu konstrukce- lze ji použít pro řešení konstrukcí stěnových, deskových, prutových, konstrukcí skořepinových, konstrukcí obecně třírozměrných a různě kombinovaných. Je universální vzhledem k tvaru konstrukce- jedním typem algoritmu řešíme např. desku pravoúhlou, šikmou, desku s otvory apod., nebo rám pravoúhlý, či rám s šikmými nebo zakřivenými pruty, atd. Její universalita se vztahuje také na okrajové podmínky (podepření) a zatěžovací účinky, dále na proměnnost materiálu v konstrukci a další okolnosti. Pomocí FEM se řeší i úlohy fyzikálně nelineární (plasticita apod.), geometricky nelineární (velké deformace, stabilita) a je využívána při řešení úloh stavební dynamiky. Pomocí FEM byla vyřešena řada úloh, které doposud nebylo možno řešit vůbec.

U lineárních statických úloh vede FEM na soustavu algebraických lineárních rovnic, která má výrazně pásový charakter a k jejímuž řešení je proto potřeba nižšího počtu operací a menšího rozsahu paměti počítače, než při řešení soustav s plnou maticí. Praktické aplikace ale představují soustavy o stovkách i tisících neznámých, z čehož je zřejmé, že je nutno pracovat s poměrně složitým a účelně vypracovaným programem na samočinném počítači a že některé výpočty mohou být dosti nákladné.

Vyšší cena výpočtu je částečně vyvážena skutečností, že řešení FEM poskytuje zpravidla mnohem podrobnější a úplnější informace. Nedostáváme, tak jako u klasických metod – jen ohybový moment a průhyb uprostřed řešené desky, nýbrž hodnoty těchto veličin v desítkách či stovkách bodů pro různé zatěžovací stavy, takže návrhy konstrukcí je možno provádět zodpovědněji a ekonomičtěji. Bez další automatizace vyhodnocování a zpracování výsledků, např. graficky, však mnohdy zatím zůstává větší část výsledků nevyužita. Poznamenávám ještě, že automatizovaný charakter, který má FEM, umožňuje snadněji provádět alternativní řešení či hledat optimální tvary konstrukcí.

Vznik této metody je možno datovat do roku 1943, kdy německý matematik Richard Courant (1888-1972) publikoval práci, zabývající se problémem torse, a v ní nastínil matematický postup, který byl vlastně základ FEM. Brzy byly publikovány také další práce, vycházející z konstrukčního, inženýrského pojetí (Hrenikov, Argyris, Clough), na které pak koncem padesátých a začátkem šedesátých let navázala řada autorů (Turner, Melosh, Martin, Zienkiewicz, Cheung). Teorie a aplikace FEM byla v šedesátých letech úspěšně rozvíjena řadou dalších autorů a přitom byl postupně kladen větší důraz na matematickou formulaci problému. Ze známých autorů 60-tých let stojí za zmínku jmenovat ještě alespoň Fellippu, Ironse, Marcalu, Odena, Veubeke, z českých a slovenských to byli zejména Vladimír Kolář, Kratochvíl, Zlámal a Ženíšek.

2.4.2.1 Postup výpočtu u Metody konečných prvků

Konečné prvky se získají rozkladem oblasti na geometricky jednoduché, vzájemně disjunktní podoblasti. Rovinné oblasti se rozkládají na troj až čtyřúhelníkové prvky, prostorové oblasti pak na čtyřstěny nebo kvádry apod. Rozklad se označuje jako síť konečných prvků. Kolik prvků síť obsahuje, tolik lokálních aproximací je k dispozici pro modelování splinů hledané funkce. Aproximační funkce se volí jednoduché, nejčastěji to bývá polynomická závislost s počtem argumentů závislým na typu úlohy. Za hranicemi prvků se aproximační funkce definují nulou. Na společné hranici prvků musí být minimálně splněn požadavek spojitosti, což vede na závislost

kombinačních koeficientů elementárních funkcí v aproximačních předpisech sousedních prvků. Problematiku řeší eliminace koeficientů pomocí funkčních hodnot ve vhodně zvolených bodech prvků. Tyto uzlové nebo někdy označované jako stykové body, se umisťují přednostně na hranici prvků, zejména do vrcholů.

Rozdělme interval $\langle a, b \rangle$ na n polí $a = x_1 < \dots < x_{i-1} < x_i < x_{i+1} < \dots < x_{n+1} = b$ a chápeme rozklad jako jednorozměrnou síť konečných prvků. Interval $\langle x_i, x_{i+1} \rangle$ představuje i -tý prvek. Lineární závislost

$$f(x) = \alpha_{1(i)} + \alpha_{2(i)} x \quad (1)$$

je použita jako příklad jednoduché aproximační funkce platící u všech prvků. Pro i -tý prvek bude $x_i \leq x \leq x_{i+1}$. Např. dosazením souřadnic uzlů x_i, x_{i+1} i -tého prvku do aproximační funkce

$$f_i = \alpha_{1(i)} + \alpha_{2(i)} x_i, \quad f_{i+1} = \alpha_{1(i)} + \alpha_{2(i)} x_{i+1} \quad (2) \text{ a } (3)$$

a vyřešením soustavy lze přejít k vyjádření, v němž vystupují uzlové funkční hodnoty f_i, f_{i+1} jako parametry

$$f_{(i)}(x) = f_i \frac{x_{i+1} - x}{x_{i+1} - x_i} + f_{i+1} \frac{x - x_i}{x_{i+1} - x_i} \quad (4)$$

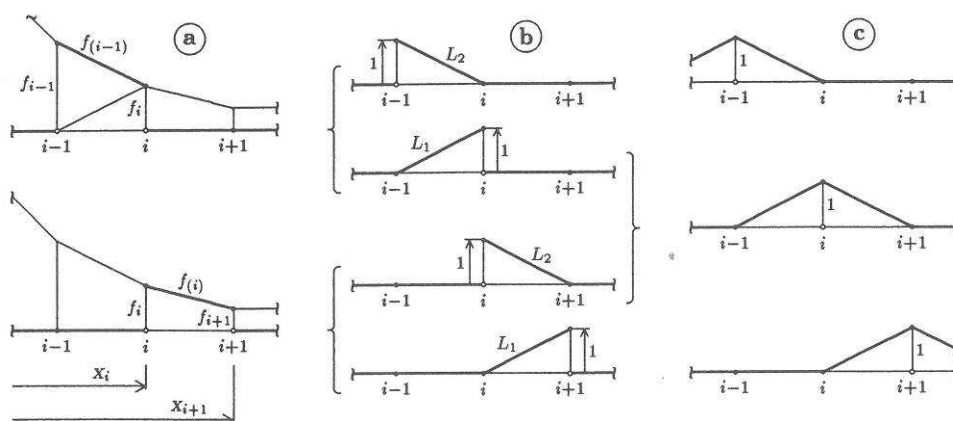
Příklad ukazuje, že aproximační funkce prvků lze navrhovat jako lineární kombinace tzv. tvarových funkcí L_j

$$f(x, y, z) = \sum_{j=1}^{\nu} f_j L_j(x, y, z), \quad (5)$$

kde f_j je funkční hodnota v j -tém uzlu, jejichž prvek obsahuje ν a funkce L_j nabývají nulových hodnot ve všech uzlech prvku $k=1, \dots, \nu$ kromě případu $k=j$, kdy je $L_j=1$. tvarové funkce mají u FEM podobný význam, jako bazové funkce u klasických variačních metod. V každém konečném prvků je

aproximační funkce lineární kombinací tolika tvarových prvků, kolik má prvek uzlových bodů.

Pojem báze funkce neztrácí u FEM na významu, operuje se s ním však méně často. Pomocí báze funkcí se vytvářejí odvozené funkce lineárními kombinacemi. Koeficienty kombinace jsou souřadnicemi výsledné funkce ve zvolené bázi a ve variačním výpočtu slouží jako prostředek pro nalezení extrému funkcionálu. U FEM přebírají roli variačních parametrů funkční hodnoty v uzlech sítě. Změna hodnoty ve vybraném uzlu ovlivňuje průběhy aproximací jen v těch prvcích, kterým uzel přísluší, u ostatních prvků se dotýčná uzlová hodnota jako parametr aproximačních funkcí neuplatňuje. Skupiny prvků soustředěných kolem uzlů vytvářejí prostorové buňky vymezující rozsahy platnosti báze funkcí. Uzly na hranici i – té buňky jsou středy nových buněk apod. každý konečný prvek leží v tolika buňkách, kolik má uzlových bodů. Právě tolik báze funkcí se v rámci prvku kombinuje do výsledné aproximační funkce a naopak, i – tá báze funkce se stává z tolika příspěvků, kolik prvků i – tou buňku vytváří. Báze funkcí uzlu i tedy vytvářejí odpovídající tvarové funkce prvků i – té buňky. Vztah aproximačních, tvarových a báze funkcí FEM znázorňuje pro jednorozměrný případ obrázek (obr. 9).



Obr. 9 – Příklad funkcí Metody konečných prvků

a – aproximačních, b – tvarových, c - báze funkcí

Jedním z důsledků aproximační techniky FEM je vyhranění fyzikálního významu řešené soustavy algebraických rovnic, která představuje při



minimalizaci potenciálu potenciální energie rovnice rovnováhy uzlových bodů. Deformační okrajové podmínky lze do soustavy rovnic zavádět až před vlastním řešením, dříve k nim není třeba přihlížet. Tato skutečnost patří k přednostem FEM, neboť na tvarové funkce nejsou kladeny žádné požadavky specifické pro konkrétní úlohu. Jinak řečeno, FEM umožňuje rozvázat operátor úlohy od vazebních podmínek tělesa, což u klasických variačních metod nelze a je to mnohdy jedním ze zdrojů obtíží. [14]

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Cíle diplomové práce

Cílem této diplomové práce bylo zjistit, jaký vliv má změna stavu napjatosti na křivku zpevnění u hlubokotažného materiálu. Při numerických simulacích tváření je třeba stanovit co nejpřesnější matematický model, aby se simulace přiblížily co nejvíce reálnému procesu. Při jednoosé napjatosti byla tato data získána pomocí statické tahové zkoušky. K měření bylo použito trhací zařízení TIRAtest2300 na Katedře strojírenské technologie. V praxi se však při tváření vyskytuje častěji víceosá napjatost. K určení vstupních dat pro víceosou napjatost byla provedena hydraulická zkouška dvouosým tahem, tzv. Bulge test. Aby byla získána co nejpřesnější vstupní data, byla tato zkouška provedena pro 3 různé geometrie tažnic, jednu kruhovou a 2 eliptické s rozdílnou geometrií.

3.2 Výpočet napětí a deformací ze statické zkoušky tahem

K nejdůležitějším zkouškám, které určují základní hodnoty mechanických vlastností materiálu patří nepochybně statická zkouška tahem. Jde o zkoušku probíhající za normou předepsaných podmínek, a to teplotně-rychlostních ($T-c(\dot{\varphi})$). Statická zkouška tahem je normalizována dle normy ČSN EN ISO 6892-1. Podle této normy se dělí i zkušební tyče. Mohou být tzv. poměrné a nepoměrné. Rozlišují se svým průřezem. Poměrná zkušební tyč má kruhový průřez a nepoměrná má průřez obdélníkový. Při experimentu v této práci, byla použita nepoměrná zkušební tyč s obdélníkovým průřezem a počáteční délkou $L_0=80\text{mm}$. Zkouška probíhala na trhacím zařízení TIRAtest2300. Aby síla procházela osou zkušební tyče, upíná se zkušební tyčka do čelistí stroje ležících v ose stroje. Po spuštění elektromotoru je uveden do pohybu příčník. Dochází k zatěžování zkušební tyče zatěžovací silou F , jejíž velikost je zaznamenávána pomocí zapisovacího zařízení v závislosti na prodloužení ΔL zkušební vzorku. Porušením zkušební tyče došlo k ukončení zkoušky tahem.

Pomocí statické zkoušky tahem lze vyhodnotit a určit řadu ukazatelů, které lze rozdělit na hlavní a vedlejší. Vedlejší ukazatele jsou odvozeny od hlavních, přesto jsou velmi důležité pro posouzení tvářitelnosti. Diagram, v němž je znázorněna závislost zatěžující síly na prodlužování zkušební tělesa se nazývá pracovní diagram.

Prodloužení ΔL [mm] zkušební vzorku je definováno jako přírůstek počáteční měřené délky L_0 [mm] v každém okamžiku během zkoušky a spočte se dle vztahu(6):

$$\Delta L = L - L_0 \quad (6)$$

,kde L [mm] je délka zkušební tyčky v kterémkoliv okamžiku zkoušky. Hodnoty z pracovního na smluvní tahový diagram jsme přepočítali pomocí vztahů (7) a (8). Smluvní napětí R ze zátěžné síly F bylo spočteno podle vztahu (7):

$$R = \frac{F}{S_0} \quad (7)$$

, kde F [N] je zátěžná síla, S_0 [mm²] je počáteční průřez zkušební tyčky a R [MPa] je smluvní napětí. Poměrná deformace ε [-], která je přírůstkem počáteční měřené délky L_0 v každém okamžiku během zkoušky vztažený na počáteční měřenou délku L_0 , byla zjištěna ze vztahu (7):

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (8)$$

Vztahy pro smluvní napětí (7) a skutečné napětí (9) jsou:

$$R = \frac{F}{S_0} [\text{MPa}] \quad \sigma = \frac{F}{S} [\text{MPa}] \quad (7) \text{ a } (9)$$

Poměrné (8) a skutečné (22) přetvoření lze vypočítat zase ze vztahu:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} [-] \quad d\varphi = \frac{dL}{L} [-] \quad (8) \text{ a } (15)$$

Aby bylo možné přepočítat smluvní diagram na skutečný, byly použity hodnoty naměřené při zkoušce tahem, zákon zachování objemu při tváření (10) a vztah pro výpočet deformace (19).

Zákon zachování objemu lze vyjádřit jako (10) a lze jej upravit také jako (11):

$$V=V_0 \qquad L_0 \cdot S_0 = L \cdot S \qquad (10) \text{ a } (11)$$

$$\frac{S_0}{S} = \frac{L}{L_0} \qquad L = \Delta L + L_0 \qquad (12) \text{ a } (13)$$

Dosazením vznikne vztah (14):

$$R \cdot S_0 = \sigma \cdot S \qquad (14)$$

Dosazením ze vztahů (12) a (13) do vztahů (10) a (11) byl získán vztah (16):

$$\sigma = R \cdot \frac{S_0}{S} = R \cdot \frac{L}{L_0} = R \cdot \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} \qquad (16)$$

, který lze upravit a vznikne (17):

$$\sigma = R \cdot (1 + \varepsilon) \qquad (17)$$

Vztah (15) jsme integrovali v mezích od počáteční po konečnou délku, abychom dostali vztah (18)

$$d\varphi = \frac{dL}{L} [-] \qquad d\varphi = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} \qquad (15) \text{ a } (18)$$

Dostali jsme vztah (19):

$$\varphi = \ln(L) - \ln(L_0) = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln\left(\frac{L_0 + \Delta L}{L_0}\right) \qquad (19)$$

, který když upravíme, dostáváme finální vztah pro skutečné přetvoření (20):

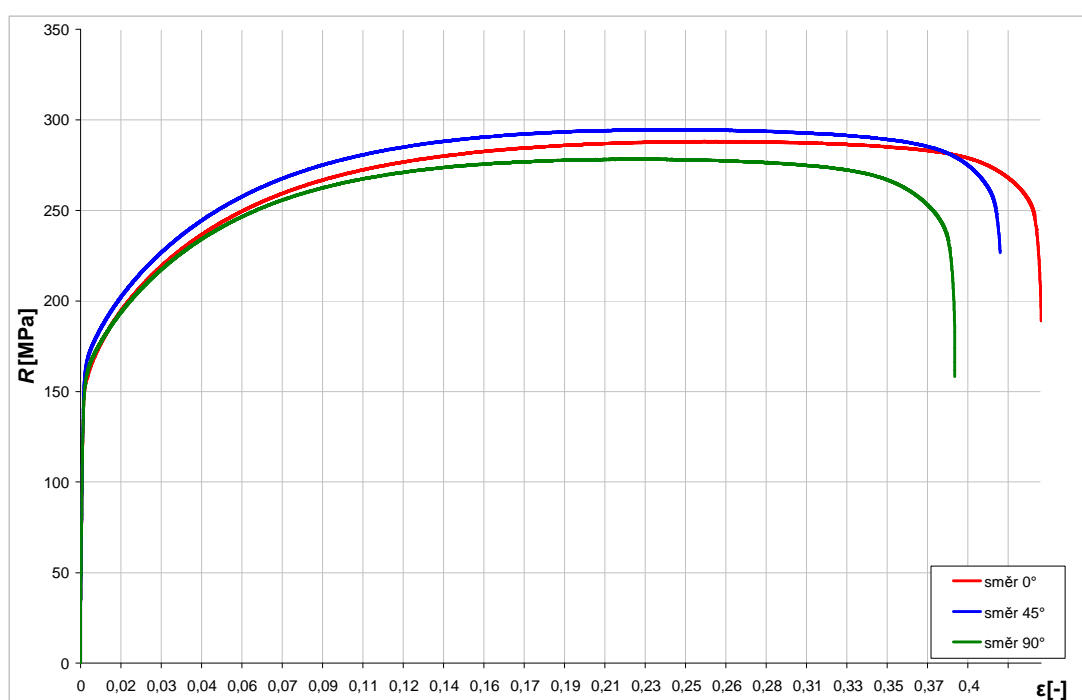
$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon) \qquad (20)$$

3.3 Použitý materiál

K experimentu byla použita nelegovaná jakostní hlubokotažná ocel DC05+ZE 75/75 BPO (dále jen DC05). Plech byl povrchově fosfátovaný. Vlastnosti toho materiálu, zjištěné pomocí tahové zkoušky (obr.10) jsou uvedeny v tabulce (tab. 6) níže:

Tab. 6 – Zjištěné mechanické vlastnosti ze statické zkoušky tahem pro námi použitý materiál DC05

	Mez pevnosti	Mez kluzu	Tažnost	Šířka vzorku	Tloušťka vzorku
	R_m	$R_{p0,2}$	A_{80mm}	b	t
	[MPa]	[MPa]	[%]	[mm]	[mm]
Směr válcování 0°	288,1	204,5	44,4	20,09	0,81
Směr válcování 45°	294,7	211,5	42,6	20,09	0,81
Směr válcování 90°	278,3	203,2	42,0	20,09	0,81



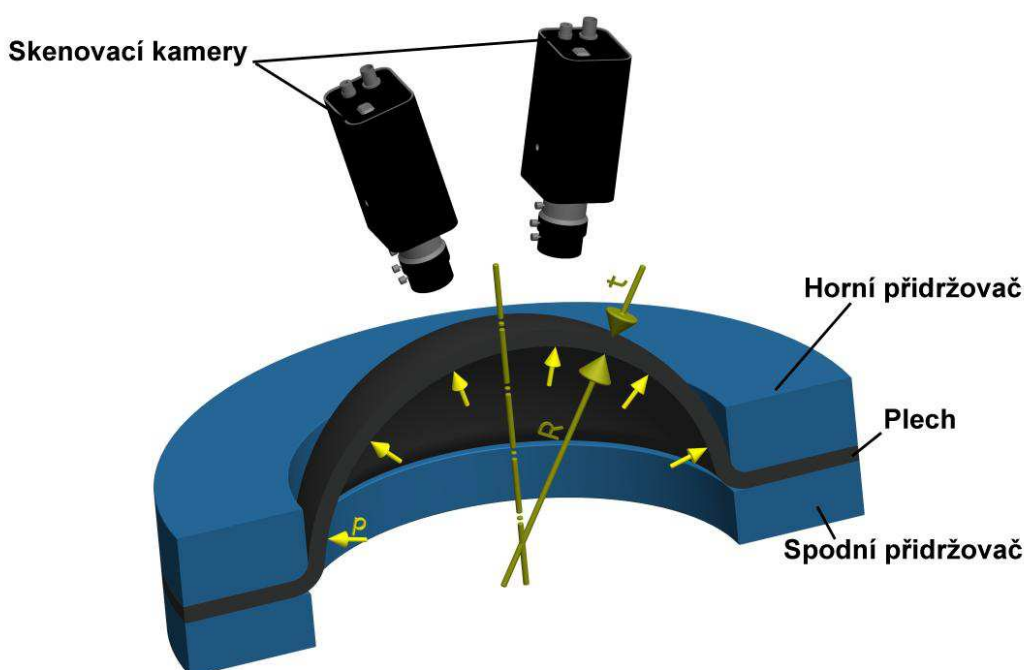
Obr. 10 – Smluvní diagram statické zkoušky tahem pro materiál DC05 ukazuje rozdílnost vlastností pro vzorky odebírané z různých směrů vůči směru válcování

3.4 BULGE test

Statická zkouška tahem je zkouška, z které lze získat příslušné materiálové charakteristiky. Jen málo se však přibližuje k tvářecím procesům v průmyslové praxi. V praxi se vyskytuje jednoosé, ale i dvouosé namáhání.

Aby bylo možné získat materiálové charakteristiky a vstupní údaje do numerických simulací pro dvouosé namáhání, byla použita zkouška

hydrostatickým vybulováním, tzv. Bulge test (obr. 11). Tato zkouška je široce používána pro zjišťování deformačního zpevnění materiálu při dvouosém namáhání. V této zkoušce lze deformace a napětí stanovit až do okamžiku porušení vzorku. Při tomto testu se dají dobře popsat plastické vlastnosti materiálu při velkých deformacích. Hydraulické vybulování je dlouho známo jako zkouška, při které lze posoudit tažnost materiálu. [15]



Obr. 11 -Bulge test – zkouška hydrostatickým vypínáním [16]

3.4.1 Příprava vzorků

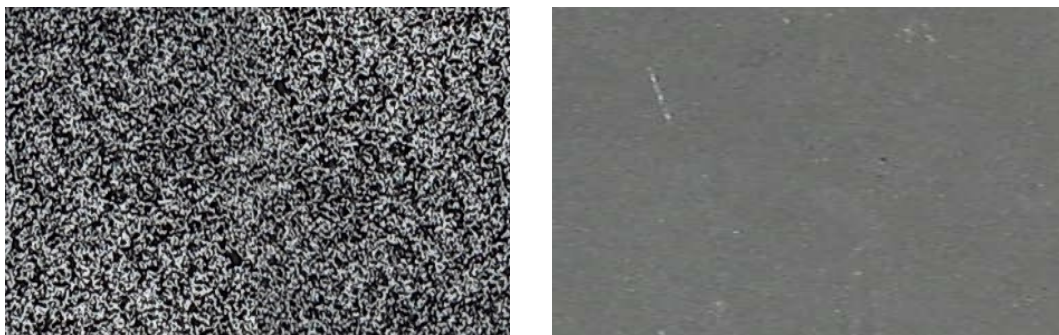
Před provedením BULGE testu na hydraulickém dvojčinném lisu CBA 300/63 (obr.12) a měření za pomoci systému ARAMIS jsme nanесли na zkušební vzorky ve tvaru kruhového výstřihu speciální deformační síť. Postup nanášení sítě byl následující.



Obr.12 – Zařízení, na kterém byl prováděn experiment -hydraulický dvojčinný lis CBA 300/63. Vpravo je možno vidět trigger a notebook na zpracování dat

Vzorek byl nejprve očištěn a odmaštěn za pomoci technického benzínu. Poté byla nastříkána na jednu stranu vzorku bílou akrylovou barvou tak, aby neprosvítal původní materiál. Bylo dbáno na to, aby vrstva bílé barvy, nebyla moc tlustá. Po zaschnutí bílé vrstvy, byl proveden nástřik černou akrylovou barvou a byl tak vytvořen stochastický povrch vzorku (obr. 13).

Při vytváření deformační sítě jsme dbali na to, aby nebyla příliš tmavá či světlá a neobsahovala velké černé a bílé plochy. Proces samotného tváření by měl proběhnout do 10 minut od samotného nanesení černé barvy, neboť po delší době by hrozilo odlupování námi nastříkané deformační sítě a dopouštěli by jsme se nepřesnosti při měření dat.



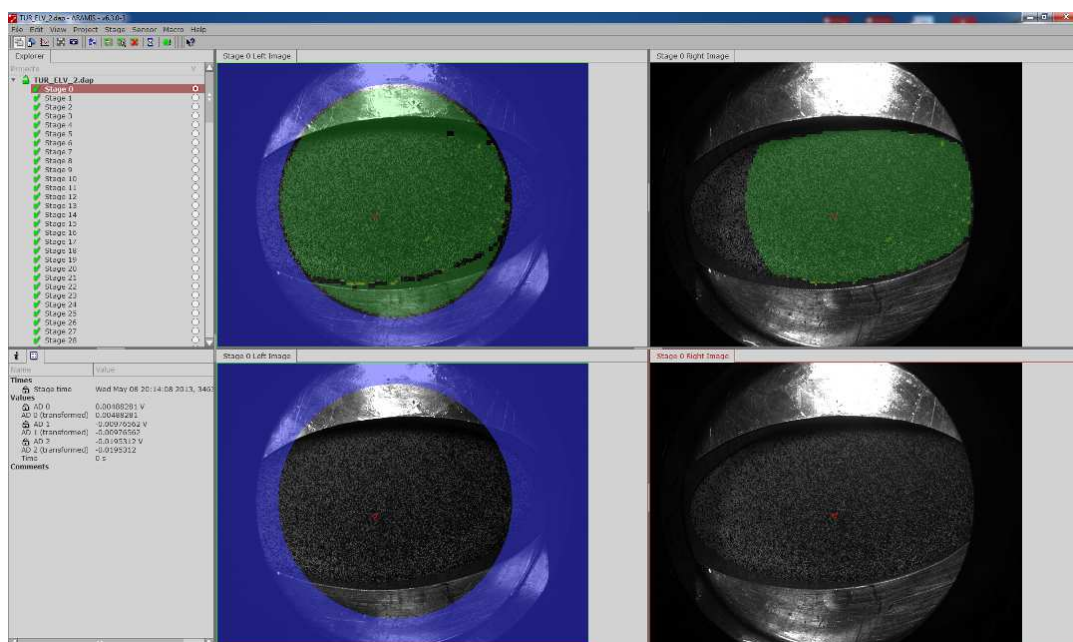
Obr.13– Náhodně nastříkaná deformační síť – vlevo
v porovnání s původní barvou plechu - vpravo

3.4.2 Příprava měřicího systému

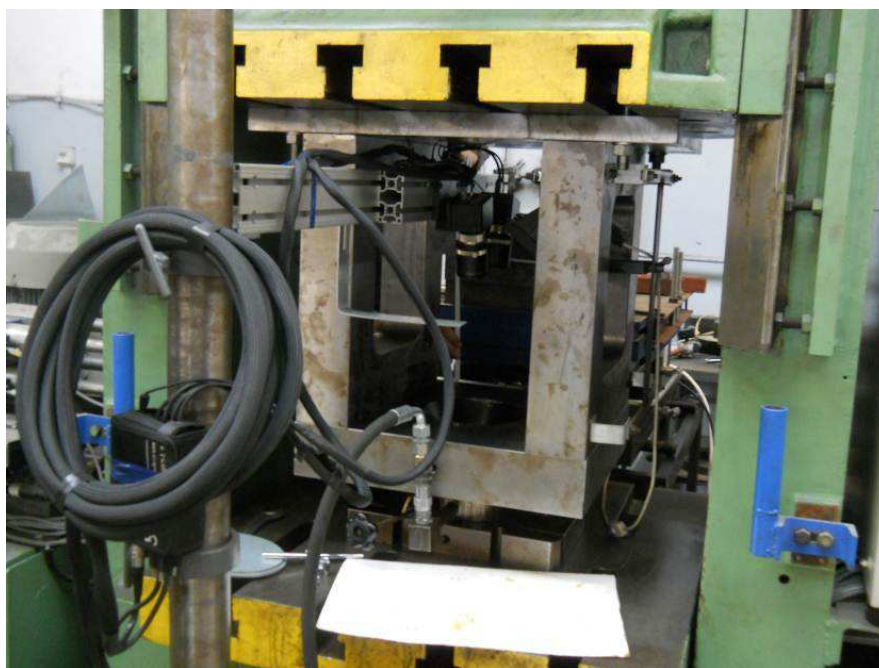
K měření byl použit bezkontaktní optický systém ARAMIS, konkrétně modifikace 2M. Existuje více modifikací tohoto systému (tab.7), každý má trochu jiné nastavení. Systém ARAMIS je potřeba před každým měřením kalibrovat, neboť nemají funkci automatického zaostřování. Na začátku se kamery nechají zahřát po dobu 10 minut, aby vše probíhalo za provozních podmínek. Poté se odkrývají objektivy obou kamer.

Tab.7 - Tabulka konfigurací systému ARAMIS. [17]

Konfigurace systému	2M	5M	4M	12M	HS
Kmitočet obnovení [Hz]	až 15 (29)	až 15 (29)	až 60 (480)	až 24 (367)	až 500 (4000)
Rozlišení kamery [pixel]	1624x1236	2448x2050	2352x1728	4096x3072	1280x1024
Oblast měření	$\text{mm}^2 > \text{m}^2$	$\text{mm}^2 > \text{m}^2$	$\text{mm}^2 > \text{m}^2$	$\text{mm}^2 > \text{m}^2$	$\text{mm}^2 > \text{m}^2$
Rozsah měření deformace [%]	0,01 až > 100	0,01 až > 100	0,01 až > 100	0,01 až > 100	0,01 až > 100
Přesnost měření deformace [%]	až 0,01	až 0,01	až 0,01	až 0,01	až 0,01



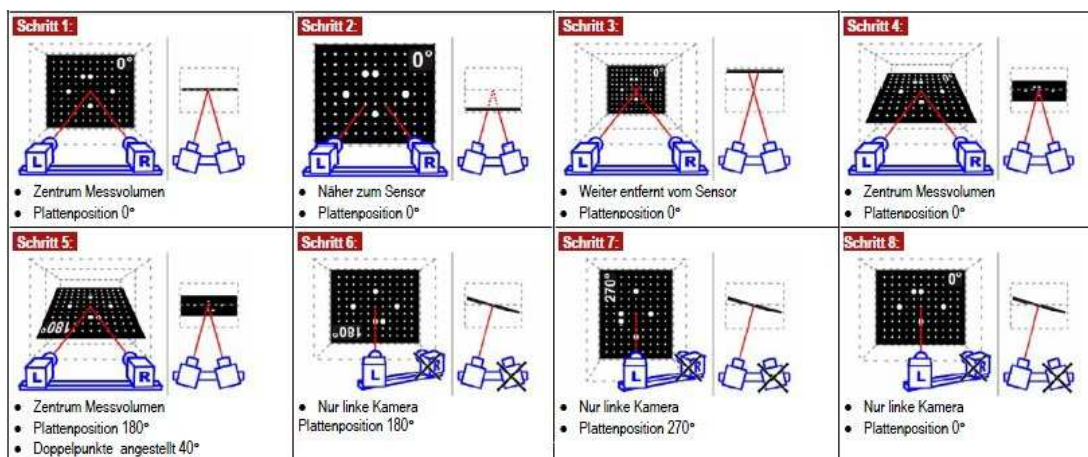
Obr. 14 – Zobrazení pohledu dvojice kamer v softwaru systému ARAMIS



Obr. 15 – Umístění kamer v nástroji hydraulického lisu

Bylo zapotřebí zaostřit kamery na požadovanou vzdálenost a nastavit světelné clony. Kdyby se nastavení clon neprovedlo správně, software by nebyl schopen správně spočítat snímáný objekt (obr. 14). K osvětlení objektu s deformační sítí bylo použito halogenové světlo. Kalibrace se pro přesnost provádí přímo v nástroji, protože je nutné vytvořit tzv. kalibrační objem.

K výpočtu měření lze použít pouze body ležící v kalibračním objemu, body ležící mimo tuto oblast systém nenasnímá. Kamery jsou umístěny na hliníkovém profilu, který je po vložení do nástroje připevněn k předem připraveným stojanům (obr.15).

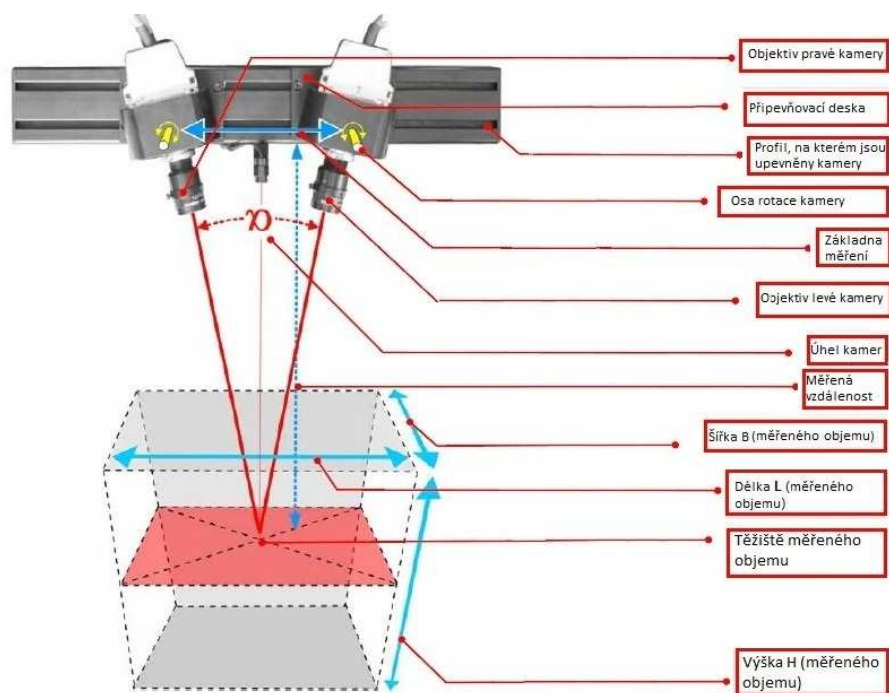


Obr.16 – Ukázka části postupu kalibrace systému ARAMIS [17]

Vlastní kalibrace byla provedena podle pokynů příslušného softwaru . Používá se k ní kalibrační destička (obr.17), která se volí podle snímaného objemu (obr. 18). V našem případě byla využita menší destička o rozměrech 90 x 70 mm. Software sám dává pokyny, jak destičku naklopit, natočit, přiblížit či oddálit vůči objektivům kamer (obr.16).



Obr.17 – Kalibrační destička 90 x 70 mm, použitá pro kalibrování [17]



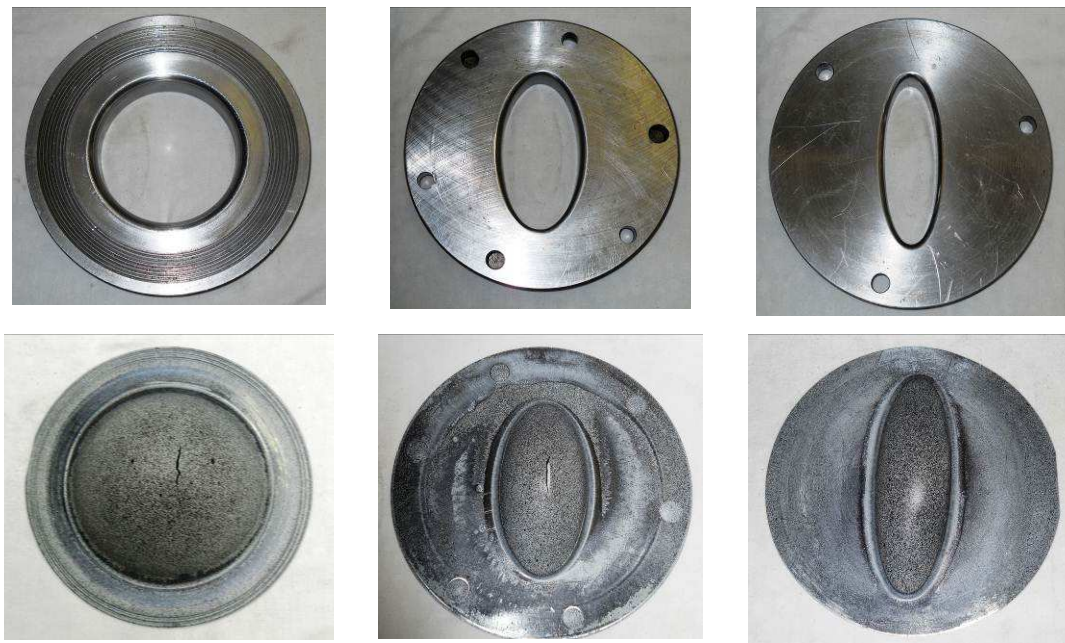
Obr. 18 – Schéma a popis měřeného objemu systémem ARAMIS [17]

3.4.3 Vlastní měření

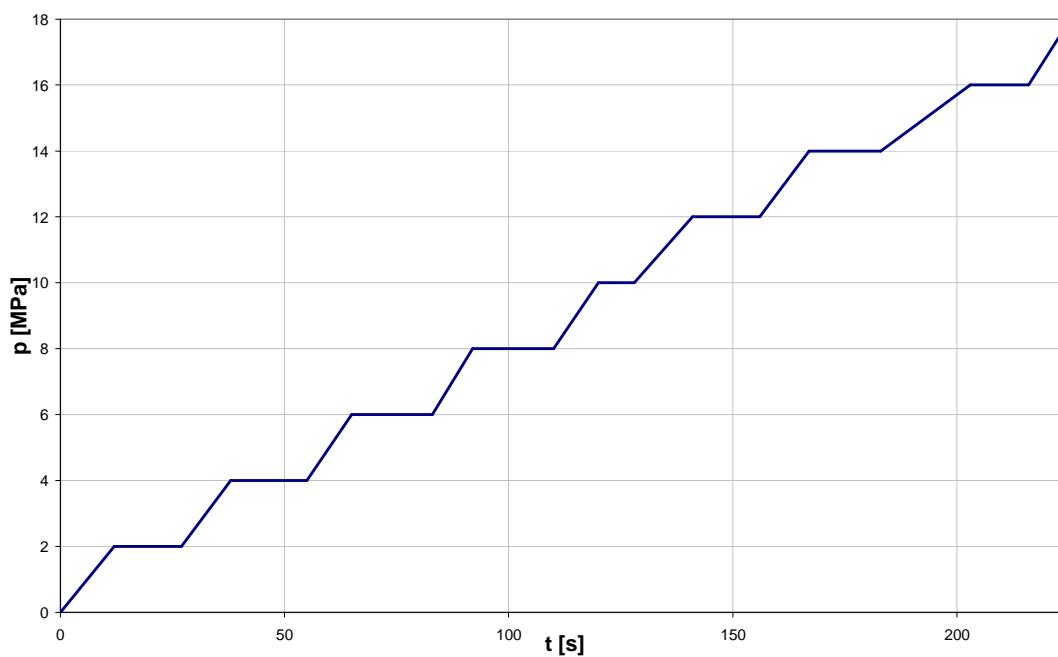
Veškerá měření byla prováděna v dílnách na Katedře strojírenské technologie Technické univerzity v Liberci. K provedení Bulge testu bylo použito hydraulického dvojčinného lisu CBA 300/63. Pomocí připojeného notebooku byl řízen tlak kapaliny, kterou se tvářelo. Byly použity 3 různé tažnice s rozdílnou geometrií otvoru, jak je patrné na obr.19.

Pro každou geometrii byly tvářeny 2 vzorky. Na předem daných tlacích bylo vždy chvíli setrváno, aby bylo vyloučeno zpoždění v hydraulickém systému (obr. 20). U každé deformace bylo měřeno při jiných hodnotách tlaku, neboť i rozsah měření se lišil. Tváření bylo prováděno, až do porušení materiálu - překročení meze pevnosti, až do vzniku trhliny.

Celý proces byl snímán bezkontaktním systémem ARAMIS.(obr.21) Tento systém zaznamenával tváření s frekvencí snímání, která byla nastavena na 2 snímky za sekundu, přes trigger do PC, který byl vybaven příslušným softwarem. Snímání probíhalo vždy od počátku tváření až po vznik trhliny na povrchu vzorku.



Obr.19 – Použité tažnice a příslušné vzorky
vlevo - tažnice s kruhovým otvorem
uprostřed a vpravo – tažnice s elipsovým otvorem



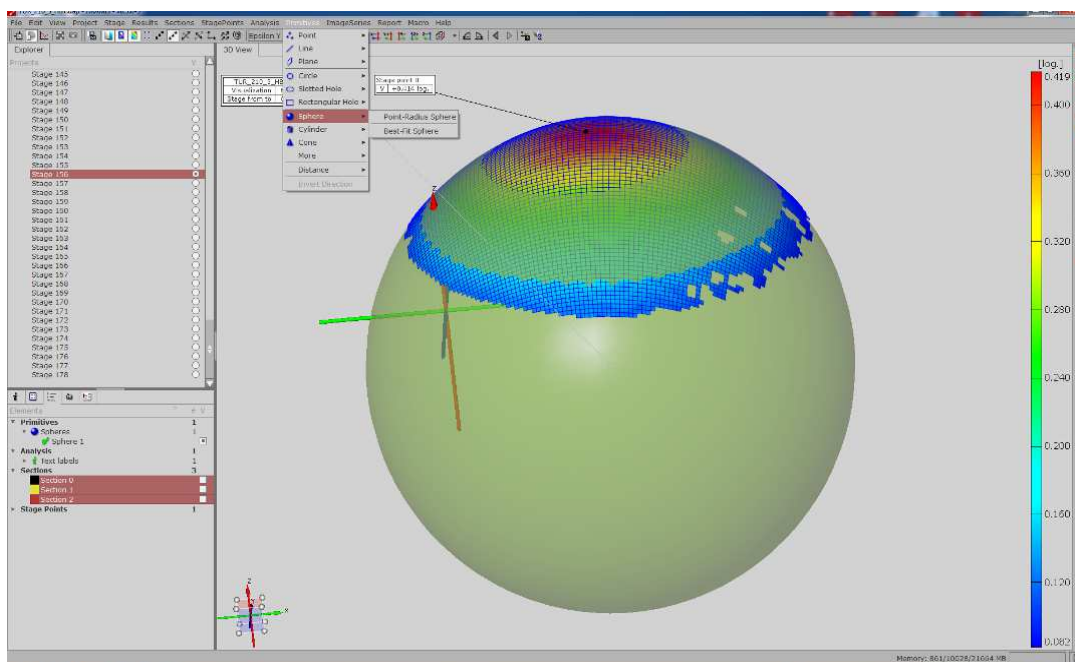
Obr. 20- Ukázka setrvání na daných tlacích pro vyloučení zpoždění
v hydraulickém systému

Jako poslední snímek zkoušky byl vždy považován ten, na kterém byla již viditelná trhlina. Naměřená data byla z PC přesunuta na výpočetní stanici, kde byla zpracována pomocí speciálního softwaru. Software snímá povrch zkušebního vzorku, rozdělí jej na fazetky a vyhodnocuje jejich vzájemné posunutí, rychlost a zrychlení (obr.14) tak, jak byla nastavena frekvence snímání.



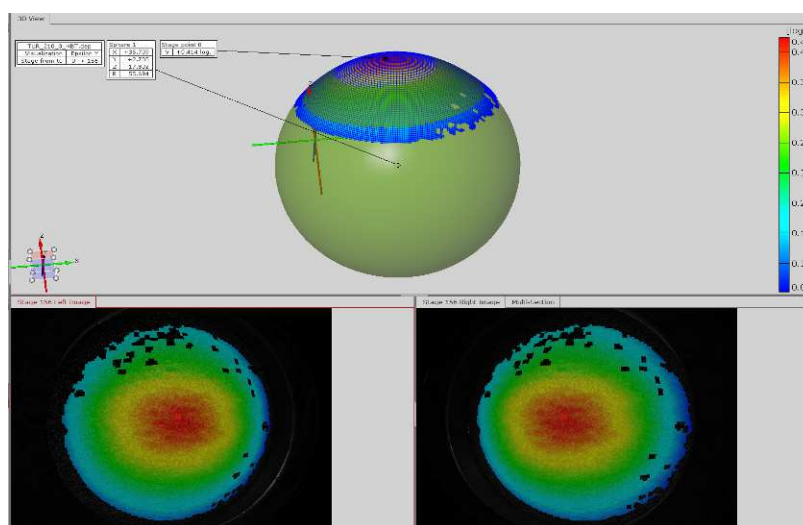
Obr. 21 Pohled do nástroje na objektivy kamer optického systému ARAMIS
a na osvětlení snímané oblasti

3.5 Vlastní výpočet skutečného napětí a deformace



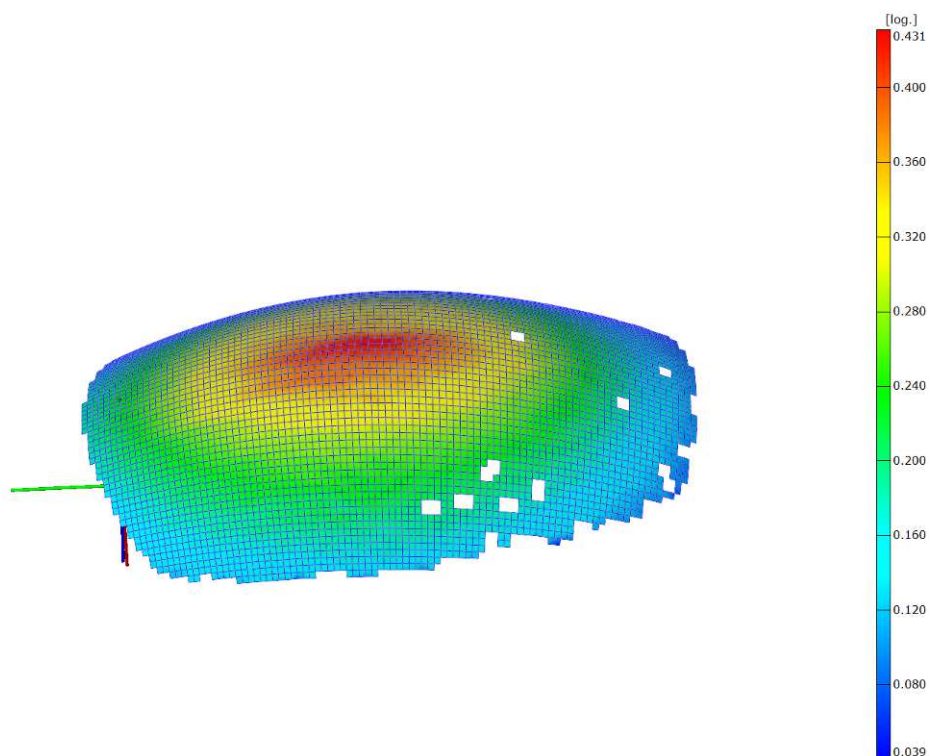
Obr. 22 -Vytvoření sféry a zjištění poloměru zaoblení v softwaru pro zpracování dat systému ARAMIS

Aby z vypočtených modelů bylo možné vypočíst napětí a deformace při dvouosém namáhání, bylo nutné získat hodnoty poloměrů zaoblení vzorků. Pro vzorky, vytvořené tažnicí kruhovitěho tvaru (obr.19.-vlevo) , bylo využito funkce „PRIMITIVES-SPHERE-BEST FIT SPHERE“(obr.22 a obr. 23) v softwaru systému ARAMIS.



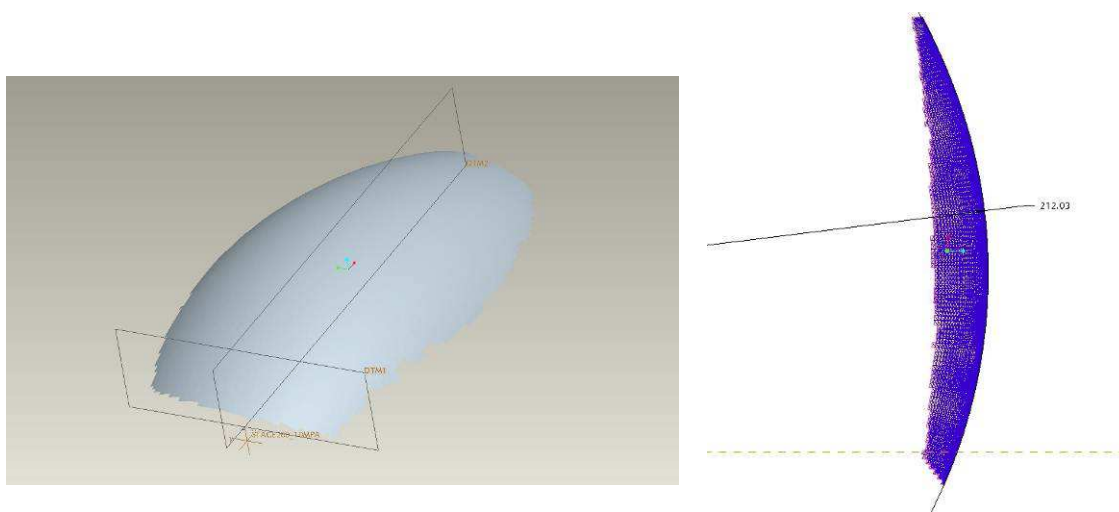
Obr. 23 -Vytvoření sféry a zjištění poloměru zaoblení v softwaru pro zpracování dat systému ARAMIS

TUR_ELV_2.dap
Visualization: Major Strain
Stage from to: 0 -> 135



Obr. 24 - Model zpracovaných dat elipsovitého vzorku v softwaru systému ARAMIS

Tento software však neumí zjišťovat poloměry vzorků, které mají elipsovitý tvar (obr. 24), proto bylo nutné převést data do formátu IGES, který slouží k přenášení 3D modelů mezi různými CAD systémy. K zjištění poloměrů vzorků dvou zbylých geometrií bylo použito konstrukčního programu ProEngineer (Obr.25).



Obr. 25-Zjištění hodnoty radiusů pomocí programu ProEngineer

Hodnoty deformací φ_1 , φ_2 , φ_3 byly zjištěny také z měření systémem ARAMIS. Deformace φ_1 byla zvolena v podélné ose výlisku (čili i v ose kamer měřicího systému ARAMIS), deformace φ_2 kolmo na ní v rovině měření a deformace φ_3 kolmo na tuto rovinu v tloušťce. Ze zákona stálosti objemu při tváření vyplývá, že objem tělesa před tváření je shodný s objemem tělesa po tváření. Na základě tohoto zákona platí vztah (21) o součtu deformací v jednotlivých hlavních směrech tváření.

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (21)$$

3.5.1 Výpočet napětí a deformací pro vzorky z kruhové tažnice

Hydraulický Bulge test (obr. 26) je metoda testování plechu v dvouosém namáhání. Plech se vyboulí a v blízkosti vrchlíku se stává téměř kulatý. Tahová napětí σ_1 a σ_2 lze vypočítat podle rovnice (22):

$$\frac{\sigma_1}{R_1} + \frac{\sigma_2}{R_2} = \frac{p}{t} \quad (22)$$

$$\sigma_i = \sigma_1 = \sigma_2 = \frac{p \cdot R}{2 \cdot t} \quad (23)$$

Aktuální tloušťku t lze odvodit z rovnice

$$t = t_0 \cdot e^{\varphi_3} \quad (24)$$

, kde je:

σ_iintenzita napětí [MPa]

σ_1hlavní napětí [MPa]

σ_2vedlejší napětí [MPa]

ptlak kapaliny [MPa]

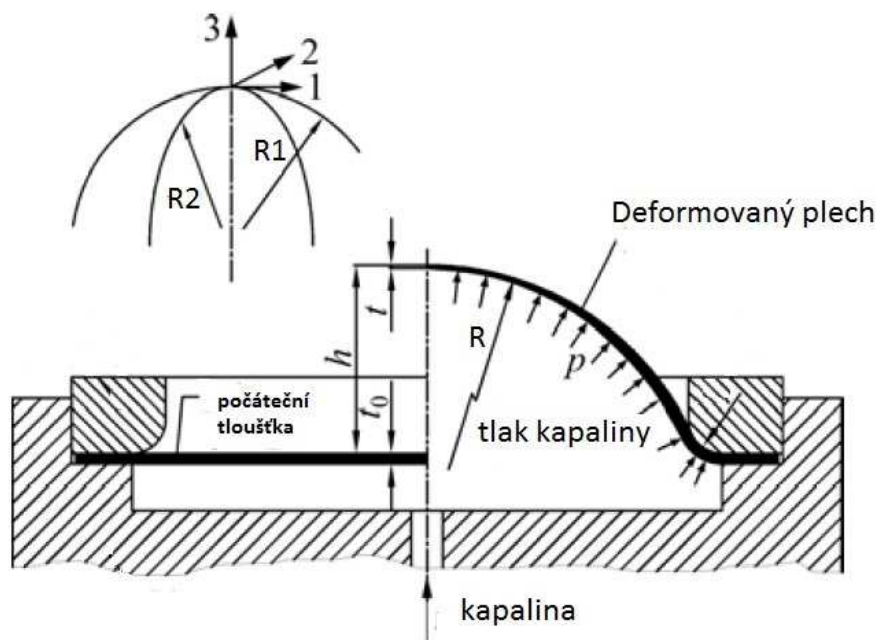
Rpoloměr zaoblení vzorku [mm]

t tloušťka v daném okamžiku [mm]

t_0počáteční tloušťka [mm]

ezáklad pro přirozený logaritmus

φ_3přetvoření ve směru tloušťky



Obr.26 - Schéma hydraulického Bulge testu [18]

Vzhledem k tomu, že se jedná o bi-axiální napjatost, musí být použity hodnoty intenzity napětí σ_i [MPa] a intenzity deformace φ_i [-]. Efektivní deformace se vypočte podle vztahu (25).

$$\varphi_i = \frac{\sqrt{12}}{3} \cdot \sqrt{\varphi_1^2 + \varphi_2^2 + \varphi_1 \cdot \varphi_2} \quad (25)$$

,kde je:

φ_i intenzita přetvoření [-]

φ_1 hlavní přetvoření [-]

φ_2 vedlejší přetvoření [-]

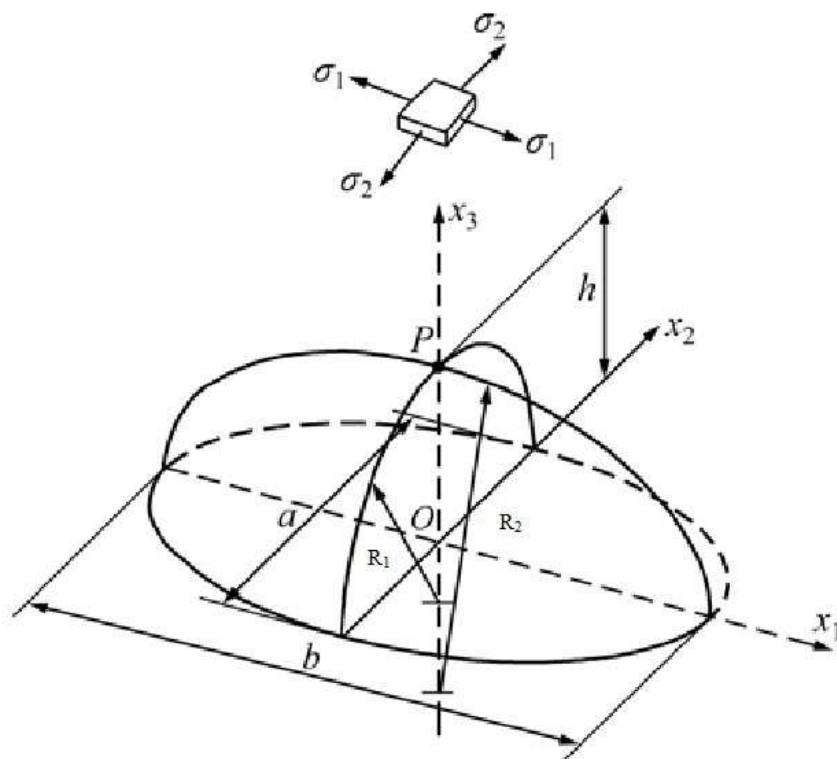
Hodnota intenzity napětí je v tomto případě totožná (26) s oběma tahovými napětími.

$$\sigma_i = \sigma_1 = \sigma_2 \quad (26)$$

3.5.2 Výpočet napětí a deformací pro vzorky z eliptické tažnice

Hlavním rysem Bulge testu, při použití eliptické tvárnice je eliptický tvar otvoru. (obr.19 uprostřed a vpravo). Změnou poměru mezi vedlejší a

hlavní osou a a b , v uvedeném pořadí jsou získávána různá namáhání (obr.27). První tažnice s eliptickým otvorem (obr.19 uprostřed) má poměr os $a/b = 0,53$, druhá (obr.19 vpravo) má poměr $a/b = 0,29$.



Obr. 27- Geometrie vzorku vzniklého vyboulením přes tvárnici s eliptickým otvorem [18]

Deformovaný povrch vzorku můžeme považovat za rotační elipsoid. Hodnoty hlavních napětí lze pak určit pomocí vzorců podle Timošenka [18]:

$$\sigma_1 = \frac{R_1 \cdot p}{2 \cdot t} \quad \sigma_2 = \frac{R_1 \cdot p}{2 \cdot t} \cdot \left(2 - \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (27) \text{ a } (28)$$

, kde je:

R_1 poloměr zaoblení ve směru hlavního napětí [mm]

R_2 poloměr zaoblení ve směru vedlejšího napětí [mm]

ekvivalentní napětí pak lze definovat jako :

$$\sigma_i = \frac{(2 - \beta) \cdot p \cdot R_2}{2 \cdot t} \quad (29)$$

, kde β je poměr poloměrů zaoblení výlisku ve směru hlavního a vedlejšího napětí

$$\beta = \frac{R_2}{R_1} = konst. \quad (30)$$

je pak považováno za konstantní poměr pro danou geometrii otvoru.

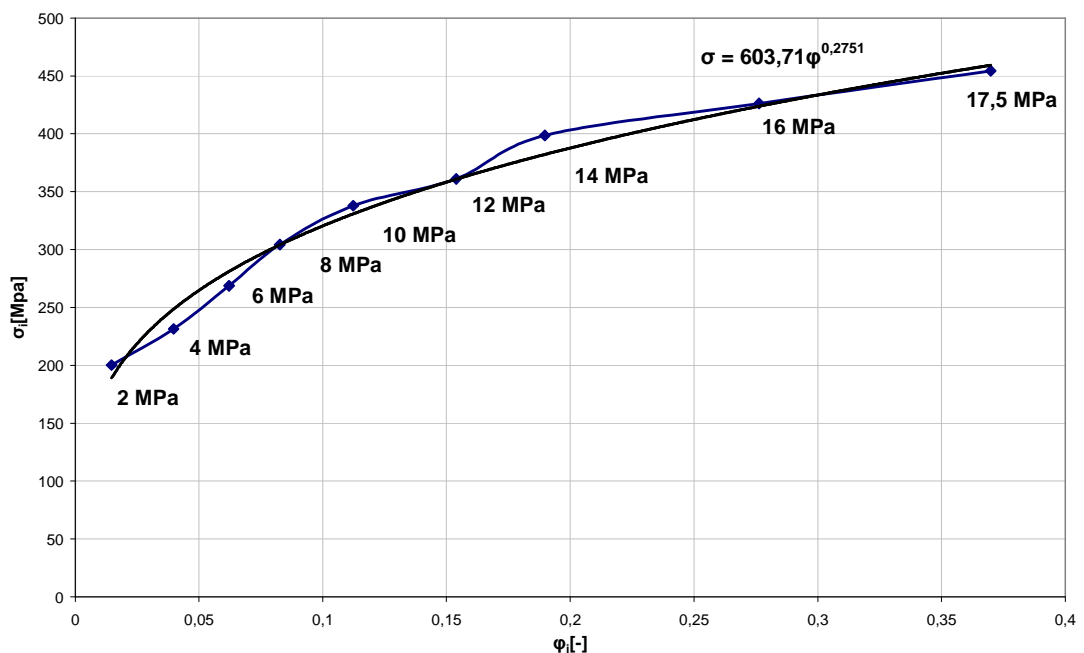
Odpovídající deformaci pak lze definovat :

$$\varphi_i = \frac{2 \cdot \sqrt{3}}{3} \cdot \sqrt{\varphi_1^2 + \varphi_2^2 + \varphi_1 \cdot \varphi_2} \quad (31)$$

Aktuální hodnotu tloušťky lze odvodit ze vztahu:

$$t = t_0 \cdot e^{-(1+\beta) \cdot \varphi_2} \quad (32)$$

Křivku zpevnění (obr. 28) obsahující efektivní napětí a odpovídající deformace lze pak zkonstruovat pomocí rovnic (29) a (31).



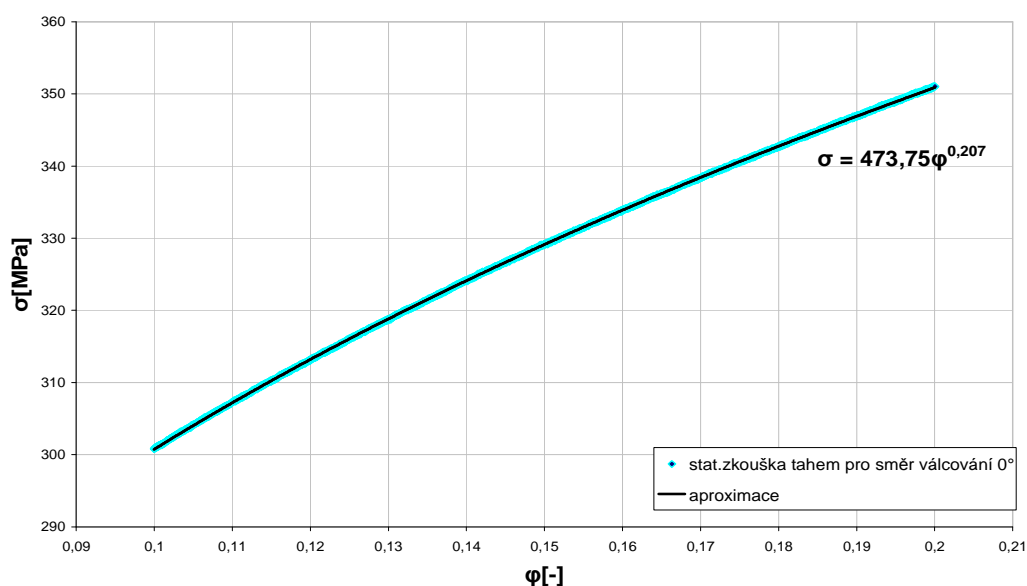
Obr.28 - Křivka zpevnění - průběh intenzity napětí a intenzity deformace u výlisku taženého přes tažnici s eliptickým otvorem. V grafu je provedena i aproximace křivky zpevnění

4 VÝSLEDKY

Statická zkouška tahem byla provedena proto, aby bylo možné určit skutečné hodnoty napětí a přetvoření pro daný materiál při jednoosém stavu napjatosti. Zároveň byly zjištěny základní mechanické vlastnosti tohoto materiálu a také byly zjištěny pevnostní koeficient C [MPa] a exponent deformačního zpevnění n [-] pro Hollomonovu aproximaci tahové zkoušky (29). Výsledky zjištěných koeficientů jsou uvedeny v tabulce (tab. 8) pro každý použitý směr válcování plechu. Hollomonova aproximace byla provedena podle normy EN 10 130. Proto byla použita pro aproximaci přetvoření ϕ z intervalu hodnot $\phi \in <0,1;0,2>$, (obr. 29)

Tab. 8 – Přehled zjištěných pevnostních koeficientů a exponentů deformačního zpevnění

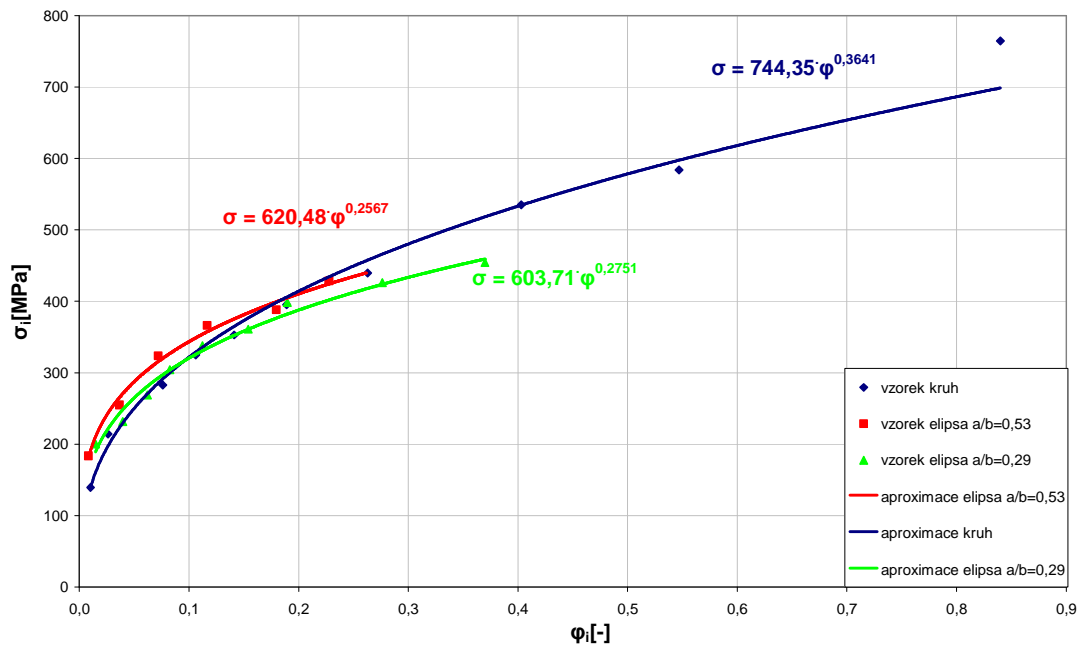
Směr válcování	Pevnostní koeficient C	Exponent deformačního zpevnění n
[°]	[MPa]	[-]
0°	473,75	0,207
45°	501,89	0,222
90°	503,98	0,209



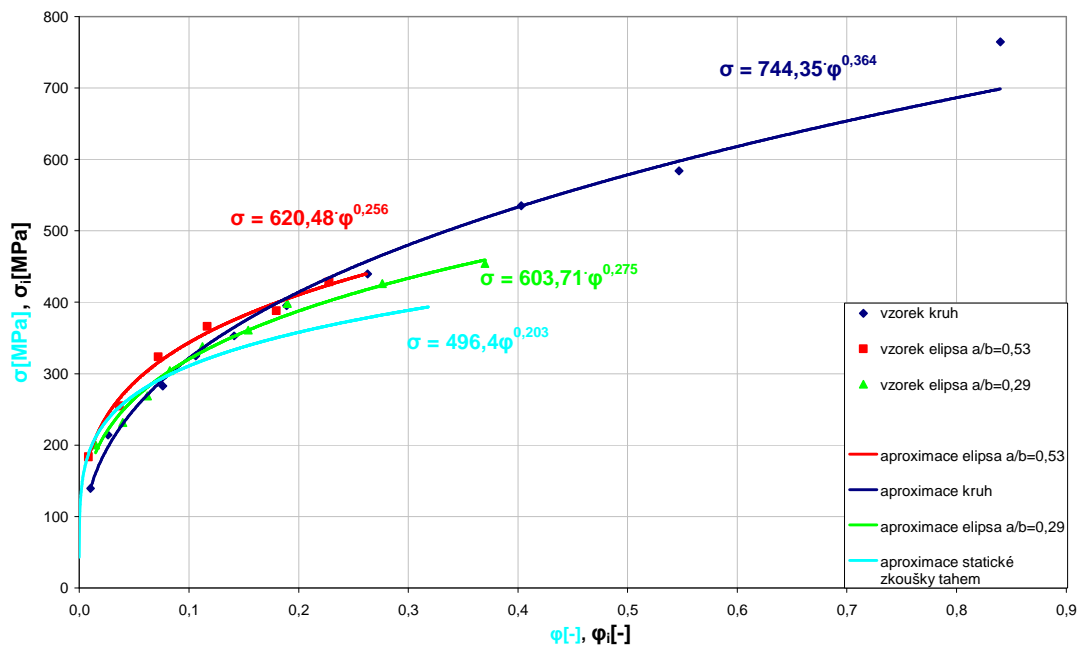
Obr.29 – Hollomonova aproximace pro křivku zpevnění z tahové zkoušky

Hollomonova rovnice je dána vztahem (33):

$$\sigma = C \cdot \varphi^n \quad (33)$$



Obr.30 - Porovnání konstant C a n při aproximaci křivek zpevnění při dvuosé napjatosti



Obr. 31 - Porovnání křivek zpevnění pro jednoosou napjatost a dvuosou napjatost

Zjištění pevnostního koeficientu C a exponentu deformačního zpevnění n jsme provedli i pro provedené Bulge testy (obr.30).

Při porovnání křivek zpevnění (obr. 31) pro jednoosou a dvouosou napjatost je patrné, že při dvouosé napjatosti dochází k výraznějšímu zpevnění materiálu. Vysoká hodnota exponentu deformačního zpevnění n u vzorku získaného tažením přes tažnici s kruhovým otvorem svědčí o rovnoměrném rozložení deformace při vypínání. Ve všech 3 případech dvouosého namáhání dochází k výraznému mechanickému zpevnění materiálu

Nejvýrazněji se materiál mechanicky zpevňuje při vypínání přes kruhový otvor v tažnici. Pevnostní koeficient C je větší při dvouosém namáhání až o 240 MPa u vzorku z kruhové tažnice, o přibližně 100 MPa u elipsovitého vzorku s užší geometrií a o 125 MPa u elipsovitého vzorku s širší geometrií. a zvýšení meze pevnosti oproti jednoosé napjatosti, skoro až 1,5 krát. Zjištěné hodnoty pevnostního koeficientu C a exponentu deformačního zpevnění jsou uvedeny v tabulce (tab. 9).

Tab. 9 – Přehled zjištěných hodnot pevnostního koeficientu C a exponentu deformačního zpevnění n

Typ zkoušky	Pevnostní koeficient C	Exponent deformačního zpevnění n
	[MPa]	[-]
Statická zkouška tahem	496,40	0,203
Bulge test - kruh.vzorek	744,35	0,364
Bulge test – elipsa s $a/b= 0,53$	620,48	0,256
Bulge test - elipsa s $a/b= 0,29$	603,71	0,275

5 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo stanovit vliv změny napjatosti na křivky zpevnění u hlubokotažného materiálu. Jako základní materiál byla zvolena hlubokotažná ocel DC05. Tento materiál se často používá ke stavbě automobilové karoserie. Ke stanovení křivek zpevnění bylo použito bezkontaktního optického měřicího systému ARAMIS. Tento systém je výrobkem německé společnosti GOM GmbH, která se již řadu let zabývá vývojem a výrobou optických měřicích systémů. Pro stanovení křivek zpevnění pro dvouosou napjatost bylo použito tzv. Bulge testu, při kterém dochází k tváření materiálu vlivem tlaku kapaliny. Tento proces byl snímán optickým systémem a následně vyhodnocen na výpočetní stanici. Měření probíhalo na dvojčinném hydraulickém lisu CBA 300/63 v dílnách Katedry strojírenské technologie na TUL. Pro stanovení křivky zpevnění pro jednoosé namáhání byla použita statická zkouška tahem, která byla provedena na trhačím stroji TIRAtest 2300.

Pomocí tabulkového a grafového editoru byly vypracovány grafy křivek zpevnění – skutečného napětí σ a skutečné deformace φ pro statickou zkoušku tahem a intenzity napětí σ_i a intenzity přetvoření φ_i . Byly stanoveny konstanty - pevnostní koeficient C a exponent deformačního zpevnění n jak pro jednoosé namáhání, tak pro dvouosé namáhání. Bylo zjištěno, že při dvouosém namáhání dochází k většímu zpevnění materiálu oproti jednoosému namáhání. Toto zjištění může mít význam v numerických simulacích tváření pro stanovení přesného materiálového modelu. Často se při stanovování materiálového modelu používají data získaná pomocí statické zkoušky tahem. Tou však zjišťujeme charakteristiku materiálu pro jednoosé namáhání. V praxi se však častěji vyskytuje víceosá napjatost. Pro dvouosou napjatost lze jako vstupní data pro definici materiálového modelu při tváření hlubokotažného materiálu použít informace získané v této diplomové práci. Mohou tak přispět k přesnější simulaci procesu tváření.

6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] POSPÍCHAL, D.: Využití optického systému ARAMIS při určování mezních stavů deformace hlubokotažného plechu. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra strojírenské technologie, 2009.
- [2] BOHM, J.: Fotogrammetrie-učební texty. Ostrava: Vysoká škola báňská-technická univerzita Ostrava, Hornicko - geologická fakulta, Institut geodézie a důlního měřictví, 2002.
- [3] www.gom.com [cit. 2011-11-13]
- [4] ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra mapování a kartografie [online]. Laboratoř fotogrammetrie [cit. 2011-11-10]. URL: <http://lfgm.fsv.cvut.cz/print.php?cap=&zal=170?=cz>
- [5] VOLEK, A.: Metodika ustavení souřadného systému pro optické měřicí zařízení Pontos. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 59 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Daniel Koutný.
- [6] SOLFRONK, P.: Studijní podklady k předmětům Teorie zpracování plechů a Experimentální metody v tváření
- [7] PLUHAŘ, J.: Nauka o materiálech. 1. vyd. Praha : SNTL, 1989. 549 s. ISBN 80-01-01427-4.
- [8] FREMUNT, P.; PODRÁBSKÝ, T.: Konstrukční oceli. Brno: CERM, 1996. 267 s. ISBN 80-85867-95-8.
- [9] www.ksp.tul.cz
Materiály z webu Katedry strojírenské technologie
[cit. 2012-03-27]
- [10] HRIVŇÁK, A.; EVIN, E.: Lisovatelnost plechov, predikci lisovateľnosti ocelových plechov s vyššími pevnostnými vlastnosťami, ELFA, 2004, ISBN 80-89066-93-3.

- [11] Simulace tažení plechů při návrhu lisovacích nástrojů [online]. 2012 [cit. 2012-06-09] Dostupné na internetu
<<http://www.mmspektrum.com/clanek/simulace-tazeni-plechu-pri-navrhu-lisovacich-nastroju.html>>
- [12] TESTOVÁNÍ SOFTWARE PAM STAMP MODELOVÝMI ZKOUŠKAMI 2012. [cit. 2012-06-09] Dostupné na internetu
<<http://www.metal2011.com/data/metal2000/sbornik/papers/209.pdf>>
- [13] MOREAU, G.;BOROUCHAKI, L.; HREMESHING,A.A. : Procedure for Numerical Simulation of Forming Processes in Three Dimensions. Troyes Ceres: Institut Charles Delaunay (FRE CNRS 2848),University of Technology of Troyes
- [14] KANÓCZ, A.; ŠPANIEL, M.: Metoda konečných prvků v mechanice poddajných těles. Vyd. 2. V Praze : Nakladatelství ČVUT, 2007. 128 s.; ISBN 978-80-01-03590-0.
- [15] RUYBALID, A.P.; Proof of principle experiments;full field bulge testing [online]. 2013 [cit. 2013-05-13] Dostupné na internetu
<<http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/11317.pdf>>
- [16] SOBOTKA, J. Přednáška: Princip a charakteristika napodobňujících zkoušek [online]. 2013 [cit. 2013-05-13] Dostupné na internetu
<<http://www.techno-mat.cz/ksp-tpk-emt/>>
- [17] Propagační materiály společnosti MCAE s.r.o.
- [18] LAZARESCU, L.; COMSA, Dan-S.; NICODIM, I; CIOBANU, I.; BANABIC, D.: Characterization of plastic behaviour of sheet metals by hydraulic bulge test; Transaction of Nonferrous Metals Society of China 2012; [online], ; [cit 2013-04-01], Dostupné na internetu
<<http://www.ysxbcn.com/down/upfile/soft/20120106/10-p275.pdf>>

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. O právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji – li diplomovou práci nebo poskytnu – li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 24 května 2013

Podpis

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with head of the thesis and a consultant.

Date: 24 May 2013

Signature